

Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Carrera de Ingeniería Mecatrónica



Automatización de procesos de medición y dosificación en cultivos  
hidropónicos

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de  
Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura

Ernesto Pocasangre Kreling

Cartago, noviembre de 2024

© CC 1.0

**CC0 1.0 UNIVERSAL**

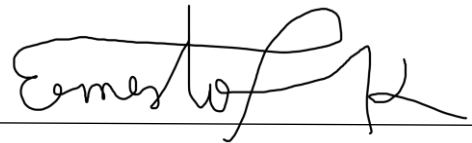
**Deed**

# *Declaración firmada del estudiante*

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



Lugar, fecha

Cartago, 21/11/2024

Firma del autor

Ernesto Pocasangre Kreling

Céd: 1 1822 0383

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**  
**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN**  
**ACTA DE APROBACIÓN**

El profesor asesor del presente trabajo final de graduación, indica que el documento presentado por el estudiante cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica para ser defendido ante el jurado evaluador, como requisito final para aprobar el curso Proyecto Final de Graduación y optar así por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura.

Estudiante: Ernesto Pocasangre Kreling

Proyecto: Automatización de procesos de medición y dosificación en cultivos hidropónicos

Firmado digitalmente por EDUARDO  
JOSE ASENJO CASTILLO (FIRMA)  
Fecha: 2024.11.21 15:53:30 -06'00'

---

Ing. José Asenjo Castillo M.Eng

Asesor

Cartago, 21/11/2024

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**  
**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN**  
**ACTA DE APROBACIÓN**

Proyecto final de graduación defendido ante el presente jurado evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, según lo establecido por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Ernesto Pocasangre Kreling

Proyecto: Automatización de procesos de medición y dosificación en cultivos hidropónicos

Miembros del jurado evaluador

**IVAN ARAYA  
MENESES (FIRMA)**

Firmado digitalmente por  
IVAN ARAYA MENESES  
(FIRMA)  
Fecha: 2024.11.21 15:53:18  
-06'00'

---

MSc. -Ing. Iván Araya Meneses

Jurado

**JOHANNA  
VANESSA MUÑOZ  
PEREZ (FIRMA)**

Digitally signed by  
JOHANNA VANESSA  
MUÑOZ PEREZ (FIRMA)  
Date: 2024.11.21 15:50:24  
-06'00'

---

MSc. -Ing. Johanna Vanessa Muñoz Pérez

Jurado

Los miembros de este jurado dan fe de que el presente proyecto final de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, 21/11/2024

# *Resumen*

El proyecto se desarrolló en la empresa Vertigreens, ubicada en Guachipelín, San José, Costa Rica, y está enfocado en la automatización de procesos de medición y dosificación de pH y EC en cultivos hidropónicos. Vertigreens utiliza técnicas de agricultura vertical para producir una serie de cultivos, los cuales son distribuidos a establecimientos de alta categoría. Aunque el sistema actual controla algunos parámetros como iluminación y flujo de agua, se identificó un potencial significativo para automatizar el monitoreo y ajuste de pH y EC, actualmente realizados manualmente.

El objetivo principal del proyecto fue diseñar un sistema automatizado que garantice condiciones de crecimiento en el cultivo hidropónico. Para ello, se implementó un sistema de sensores y actuadores conectados a través de plataformas IoT y comunicación MQTT, lo cual permite la monitorización y ajuste en tiempo real de las variables clave. Tras una fase de diseño y selección de componentes, se integró una interfaz que facilita el acceso remoto a los datos, mejorando la eficiencia y precisión en la gestión del cultivo. Los resultados validan el sistema propuesto, reduciendo la necesidad de intervención manual y mejorando la rentabilidad del proceso a largo plazo.

*Palabras clave – Automatización, Medición, Dosificación, Hidroponía, Agricultura*

# *Abstract*

The project was developed at the company Vertigreens, located in Guachipelín, San José, Costa Rica, and focuses on automating the processes of pH and EC measurement and dosing in hydroponic crops. Vertigreens uses vertical farming techniques to produce a variety of crops, which are distributed to high-end establishments. Although the current system controls some parameters, such as lighting and water flow, there was a significant opportunity to automate the monitoring and adjustment of pH and EC, which are currently performed manually.

The main objective of the project was to design an automated system that ensures optimal growth conditions in hydroponic cultivation. To achieve this, a system of sensors and actuators was implemented, connected through IoT platforms and MQTT communication, allowing real-time monitoring and adjustment of key variables. After a design phase and component selection, an interface was integrated to facilitate remote access to data, improving the efficiency and accuracy of crop management. The results validate the proposed system, reducing the need for manual intervention and enhancing long-term profitability.

*Keywords – Automation, Measurement, Dosing, Hydroponics, Agriculture*

## *Dedicatoria*

*Dedico el presente proyecto a mis padres, que siempre creyeron en mí. Les agradezco por el apoyo incondicional que he recibido, y por inculcar en mí los valores de disciplina, honestidad, respeto y excelencia, que me han acompañado hasta ahora y lo seguirán haciendo a lo largo de mi vida. Este logro académico es gracias a ustedes.*

# *Agradecimiento*

*Agradezco a Dios por darme la oportunidad de finalizar mis estudios y por haberme provisto de las fuerzas necesarias en los momentos más difíciles de la carrera.*

*Agradezco a mi familia por su apoyo incondicional y por siempre acompañarme y motivarme.*

*Agradezco a la empresa Vertigreens por abrirme las puertas a hacer este proyecto.*

*A mi profesor asesor Eduardo José Asenjo por todo su soporte y acompañamiento durante el proyecto.*

*Agradezco a todos los compañeros y amigos que tuve el placer de conocer en esta etapa universitaria. y me ayudaron a crecer como persona.*

## *Lista de Contenidos*

Lista de Figuras .....	v
Lista de tablas .....	vi
Lista de Abreviaciones.....	viii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes del proyecto.....	1
1.2 Descripción del problema a resolver .....	1
1.2.1 Justificación.....	2
1.3 Síntesis del problema.....	3
1.4 Objetivos del proyecto.....	4
1.5 Estructura del documento .....	4
Capítulo 2. Marco Teórico.....	5
2.1 Hidroponía Conceptos básicos .....	5
2.1.1 Tipos de sistemas hidropónicos .....	5
2.1.2 Propagación y trasplante.....	6
2.1.3 pH y EC .....	6
2.1.4 Iluminación.....	7
2.1.5 Temperatura y humedad .....	8
2.1.6 Ventilación y CO2 .....	9
2.1.7 Recirculación y oxigenación del Agua .....	10
2.1.8 Cosecha.....	10
2.1.9 Limpieza .....	11
2.2 Medición de variables.....	12
2.3 Dosificación de variables.....	13
2.4 Procesamiento de señales .....	13
2.5 Interfaz Gráfica y Experiencia de Usuario (UX/UI) .....	14
2.6 Comunicación IOT .....	15
2.7 VPN .....	16
2.8 Protección IP .....	16
Capítulo 3. Metodología.....	18
3.1 Descripción General .....	18

3.2 Desarrollo de la metodología.....	20
Capítulo 4. Propuesta de Diseño.....	24
4.1 Determinación de Necesidades.....	24
4.1.1 Recopilación de datos.....	24
4.1.2 Interpretar datos en forma de necesidades.....	24
4.1.3 Jerarquización de necesidades.....	26
4.1.4 Asignar importancia relativa.....	28
4.1.5 Análisis de resultados y el proceso.....	29
4.2 Especificaciones del Producto.....	29
4.2.1 Elaborar lista de métricas.....	30
4.2.2 Establecer los valores objetivo.....	31
4.2.3 Análisis sobre el proceso.....	33
4.3 Conceptualización del proceso de diseño.....	34
4.3.1 División en subproblemas.....	34
4.3.2 Búsqueda de conceptos.....	36
4.3.3 Organización y combinación de conceptos.....	39
4.3.4 Análisis del proceso.....	41
4.4 Selección y Evaluación de Conceptos.....	42
4.4.1 Filtrado.....	42
4.4.2 Selección.....	46
4.4.3 Concepto Ganador.....	49
4.4.4 Análisis.....	52
Capítulo 5. Diseño de la Solución.....	53
5.1 Descripción del hardware.....	53
5.1.1 Sistema traslación de líquidos.....	53
5.1.2 Sistema de medición y control.....	55
5.1.3 Componentes adicionales.....	56
5.2 Descripción de Selección software.....	58
5.2.1 ESPHome.....	58
5.2.2 Homeassistant.....	59
5.3 Programación y lógica de control.....	60
5.3.1 Código de esp8266.....	60

5.3.2 Interfaz gráfica en Homeassistant.....	64
5.3.3 Automatizaciones .....	66
5.4 Integraciones y aspectos adicionales .....	70
5.4.1 Montaje del sistema.....	70
5.4.2 Filtrado de datos .....	71
5.4.3 Calibración pH y EC .....	71
5.4.5 P&ID.....	73
5.4.6 VPN .....	74
Capítulo 6. Resultados y Análisis .....	75
6.1 Evaluación y Prueba de Conceptos .....	75
6.1.1 Definición de variables de muestra y establecimiento de factores de influencia	75
6.1.2 Definición del tamaño de muestra .....	77
6.1.3 Definición de pruebas.....	78
6.1.4 Resultados de las pruebas .....	80
6.2. Análisis Económico .....	85
Capítulo 7. Conclusiones y Recomendaciones.....	88
7.1 Conclusiones.....	88
7.2 Recomendaciones .....	89
Capítulo 8. Referencias bibliográficas.....	91
Capítulo 9. Apéndices.....	96
9.1 Generalidades de los Procesos en la empresa y Análisis.....	96
9.1.1 Tipos de sistema hidropónico .....	96
9.1.2 Propagación y trasplante.....	97
9.1.3 pH y EC .....	98
9.1.4 Iluminación.....	100
9.1.5 Temperatura y humedad .....	101
9.1.6 Ventilación y CO2 .....	102
9.1.7 Recirculación y oxigenación del Agua .....	103
9.1.8 Cosecha.....	103
9.1.9 Limpieza .....	103
9.2 Plano Eléctrico del modulo .....	105
9.3 Código de EspHome.....	106

9.4 Interfaz Gráfica Home Assistant .....	111
9.5 Código de Automatizaciones Home Assistant.....	116
9.5.1 Control pH Alto .....	116
9.5.3 Control EC Bajo .....	118
9.5.4 Notificación de Atención.....	120
9.6. Tablas de resultados para las pruebas de validación.....	121
9.7 Preguntas planteadas en la entrevista .....	132
10. Anexos.....	135

# Lista de Figuras

<b>Figura 3.1.</b> Proceso metodológico aplicado al proyecto.....	21
<b>Figura 4.3.1.</b> Marco inicial para descomposición funcional del problema .....	35
<b>Figura 4.3.2.</b> Descomposición funcional del Sistema .....	35
<b>Figura 4.3.2.</b> Descomposición funcional del Sistema con Conceptos Ganadores .....	49
<b>Figura 5.3.1.1</b> Interfaz gráfica para el módulo esp8266.....	61
<b>Figura 5.3.2.1.</b> Dashboard o Interfaz gráfica principal en Homeassistant .....	65
<b>Figura 5.3.2.2.</b> Entrada del usuario en la interfaz.....	65
<b>Figura 5.3.3.1.</b> Diagrama de flujo Automatización Control de pH bajo .....	67
<b>Figura 5.3.3.2.</b> Diagrama de flujo Automatización Control pH alto .....	68
<b>Figura 5.3.3.3.</b> Diagrama de flujo Automatización Control de EC bajo .....	69
<b>Figura 5.3.3.4.</b> Diagrama de flujo Automatización Envío de notificaciones .....	70
<b>Figura 5.4.3.1.</b> Kit de Calibración de pH .....	72
<b>Figura 5.4.3.2.</b> Kit de Calibración de EC .....	73
<b>Figura 5.4.5.1.</b> Diagrama P&ID del sistema implementado .....	74
<b>Figura 6.1.4.1.</b> Resultados en prueba de dosificación de fluidos .....	80
<b>Figura 6.1.4.2.</b> Resultados obtenidos para prueba de exactitud en medición de pH.....	81
<b>Figura 6.1.4.3.</b> Resultados obtenidos para prueba de exactitud en medición de EC.....	82
<b>Figura 6.1.4.4.</b> Resultados obtenidos para prueba de confiabilidad del sistema para pH ...	83
<b>Figura 6.1.4.5.</b> Resultados obtenidos para prueba de confiabilidad del sistema para EC ...	84

# Lista de tablas

<b>Tabla 3.1.</b> Marco Metodológico Aplicado al Proyecto .....	22
<b>Tabla 4.1.1.</b> Lista de necesidades formuladas.....	25
<b>Tabla 4.1.2.</b> Lista de necesidades jerarquizadas .....	26
<b>Tabla 4.1.3.</b> Lista de Necesidades con su importancia relativa .....	28
<b>Tabla 4.2.1.</b> Lista de métricas para las necesidades obtenidas .....	30
<b>Tabla 4.2.2.</b> Lista de métricas con sus valores objetivo.....	32
<b>Tabla 4.3.1.</b> Conceptos para sistema Recibir Energía Externa .....	37
<b>Tabla 4.3.2.</b> Conceptos para sistema Convertir Energía a Forma Cinética.....	37
<b>Tabla 4.3.3.</b> Conceptos para sistema Recibir y Almacenar Líquidos Reserva.....	37
<b>Tabla 4.3.4.</b> Conceptos para sistema Transportar Líquidos .....	38
<b>Tabla 4.3.5.</b> Conceptos para sistema Dosificar .....	38
<b>Tabla 4.3.6.</b> Conceptos para sistema Detectar Niveles de pH y EC .....	38
<b>Tabla 4.3.7.</b> Conceptos para sistema Procesar Señales y Generar Señal de Control .....	39
<b>Tabla 4.3.8.</b> Conceptos para sistema Interconexión y Escalabilidad.....	39
<b>Tabla 4.3.9.</b> Combinación de conceptos para sistema de traslación de líquidos .....	40
<b>Tabla 4.3.10.</b> Combinación de conceptos para sistema de medición y control .....	41
<b>Tabla 4.4.1.</b> Matriz de filtrado para el sistema de traslación de líquidos.....	42
<b>Tabla 4.4.2.</b> Matriz de filtrado para el sistema de medición y control.....	43
<b>Tabla 4.4.3.</b> Matriz de Selección para el sistema de traslación de líquidos.....	46
<b>Tabla 4.4.4.</b> Matriz de Selección para el sistema de medición y control.....	47
<b>Tabla 4.4.5.</b> Conceptos ganadores para subsistemas independientes .....	49
<b>Tabla 5.1.1.</b> Hardware empleado para el sistema de traslación de líquidos .....	54
<b>Tabla 5.1.1.2.</b> Hardware empleado para el sistema de medición y control .....	55
<b>Tabla 5.1.1.3.</b> Hardware empleado tomando en consideración los componentes adicionales. .....	57
<b>Tabla 6.1.1.1.</b> Objetivos, variables de muestra, y factores de influencia para las pruebas de validación .....	76
<b>Tabla 6.1.1.2.</b> Valores específicos de las pruebas a realizar .....	76

<b>Tabla 6.1.4.1.</b> Porcentaje de error obtenido para los tres fluidos.....	81
<b>Tabla 6.3.1</b> Desglose de inversión inicial para un módulo .....	85
<b>Tabla 6.3.2.</b> Costos de la inversión inicial .....	86
<b>Tabla 6.3.3.</b> Egresos Anuales del Proyecto .....	86
<b>Tabla 6.3.4.</b> Ingresos Anuales del Proyecto .....	86
<b>Tabla 6.3.5.</b> Indicadores de Rentabilidad 1 Módulo .....	87
<b>Tabla 6.3.6.</b> Indicadores de Rentabilidad 5 Módulos .....	87
<b>Tabla 6.3.7.</b> Indicadores de Rentabilidad 15 Módulos .....	87

# Lista de Abreviaciones

**MQTT:** Transporte de Telemetría de Cola de Mensajes

**pH:** Potencial de Hidrogeno

**EC:** Electroconductividad

**IP:** Protección al Ingreso

**IoT:** Internet de las cosas

**P&ID:** Diagrama de Tuberías e Instrumentación

**VPN:** Red Privada Virtual

**UX:** Experiencia de Usuario

**UI:** Interfaz de Usuario

# Capítulo 1. Introducción

En este capítulo se expone el contexto y los antecedentes del proyecto realizado en la empresa Vertigreens, dedicada a la producción de cultivos. Se incluye una descripción del problema por resolver y la síntesis de este mismo. Así mismo se presentan los objetivos del proyecto, que son las bases fundamentales del proceso y del documento.

## 1.1 Antecedentes del proyecto

Vertigreens es una empresa de producción agrícola moderna, cuya sede está localizada en Guachipelín, San José, Costa Rica. Tienen una gran variedad de productos gourmet y de decoración de platos. En Vertigreens se producen en su mayoría Microgreens, Baby Leaves, Flores Comestibles y Hongos Gourmet. Los cuales son distribuidos actualmente en ciertos restaurantes, hoteles, y establecimientos de alto calibre.

En la empresa se destaca el uso de la agricultura vertical, la cual es una técnica ideal para comunidades e individuos, que buscan establecerse en espacios reducidos. [1] Esta técnica permite una producción más rápida, controlada y eficiente, independientemente de la temporada y clima. Es de suma importancia la implementación de esta técnica debido a las limitaciones de espacio que se tienen en la empresa como tal, y al entorno urbano en el cual se encuentra.

Una parte del establecimiento está equipado para hacer el proceso de cultivo por medio de una estructura de estantes hidropónicos de alta tecnología. Ya algunos aspectos del proceso de cultivo están automatizados en este lugar, como el control de la luz y el flujo de agua. Sin embargo, hay procesos adicionales que tienen potencial para ser automatizados.

## 1.2 Descripción del problema a resolver

Dentro del establecimiento de cultivos que tiene Vertigreens en Guachipelín San José, se tienen divisiones espaciales para diferentes procesos. En un cuarto aislado, se encuentra

el sistema de cultivación hidropónica de alta tecnología. Como se mencionó previamente, este funciona por medio de estantes en lo que se conoce como agricultura vertical. Existen algunos procesos que ya están automatizados en la planta, como por ejemplo el flujo de agua dentro de los estantes, e igualmente la aplicación de luz artificial. Sin embargo, existen muchos otros procesos presentes que tienen un gran potencial para automatizarse.

Tanto para el pH como para la EC se tienen dos procesos, el de medición, y el de dosificación. El pH y la EC se miden cada día de forma manual. Cuando los valores de pH están fuera de cierto rango se debe de aplicar una sustancia correctora. Igualmente, con respecto a la EC. Conforme pasa el tiempo los niveles de EC bajan, los cuales hay que reponerlos mediante una dosificación. Según la empresa, estos procesos tienen gran potencial de automatización. Otro aspecto solicitado por el cliente tiene que ver con el acceso remoto y fácil a los datos, para visualización o análisis.

### **1.2.1 Justificación**

La industria agrícola es un pilar fundamental de la economía global y desempeña un papel esencial en la seguridad alimentaria y el bienestar humano. Los ingenieros reconocen la importancia de esta industria en la producción de alimentos, materias primas para la industria y recursos renovables. Además, la innovación tecnológica en el sector agrícola es crucial para enfrentar desafíos como el cambio climático, la escasez de agua y la creciente demanda de alimentos debido al crecimiento de la población mundial. [2] Un proyecto de graduación en ingeniería centrado en la industria agrícola ofrece una oportunidad única para aplicar conocimientos técnicos en un campo de vital importancia.

Después de la pandemia por Covid - 19, la importancia de proyectos enfocados en la industria agrícola se vuelve aún más evidente. La crisis sanitaria ha resaltado la necesidad de fortalecer la seguridad alimentaria y la resiliencia de los sistemas de producción agrícola ante futuros eventos disruptivos. Un proyecto de graduación que aborde desafíos como la optimización de la producción, la implementación de tecnologías de agricultura de precisión y la mejora de la cadena de suministro puede contribuir significativamente a la construcción de sistemas alimentarios más robustos y sostenibles. [3]

El proyecto planteado ataca cada una de estas líneas ya que optimiza la producción utilizando menos recursos y obteniendo un cultivo de mejor calibre. La hidroponía es un proceso eficiente. También implementa nuevas tecnologías de agricultura de precisión como el uso de sensores inteligentes y dosificadores automáticos. Y por último mejora la cadena de suministro ya que en instalaciones adentro de la ciudad como la de Vertigreens, se ahorra gran parte del transporte, tanto de los suministros, como del producto final. [4]

La implementación de un sistema automatizado para medir y regular el pH y la EC en una plantación hidropónica presenta una justificación sólida en términos de eficiencia operativa y ahorro de mano de obra. Actualmente, el monitoreo manual de estos parámetros requiere una cantidad de tiempo y esfuerzo por parte del personal que no es exorbitante, pero muchas veces no puede ser cumplido. Con un sistema automatizado, se eliminaría la necesidad de realizar mediciones manuales frecuentes, lo que reduciría drásticamente las horas de mano de obra requeridas para mantener condiciones óptimas en el sistema hidropónico. Además de esto, la hora y frecuencia de las mediciones es algo que varía debido a las tareas del personal, de manera que el uso de un sistema automático solucionaría esto también.

Cabe destacar también que la necesidad de medición se vincula mucho con la documentación formal de los procesos, y de la producción de datos que pueden ser de mucha utilidad para la empresa. La producción de datos en cualquier industria en la actualidad es algo que cada vez se considera más importante. En un proceso de cultivo hidropónico es crucial ya que proporciona información detallada sobre variables que luego serán utilizados en análisis de datos para identificar patrones, optimizar el crecimiento de los cultivos y tomar decisiones informadas sobre el manejo del sistema.

### 1.3 Síntesis del problema

Actualmente existe poca eficiencia y uniformidad de reproducción en los procesos llevados a cabo para la cultivación hidropónica, específicamente en los procesos de medición y dosificación para el control de pH y EC del agua (Nivel de Acidez y Electroconductividad).

## 1.4 Objetivos del proyecto

### **Objetivo General**

Diseñar un sistema automatizado de medición y dosificación que sea capaz de mantener las condiciones de entorno para el crecimiento de los cultivos en un sistema hidropónico.

### **Objetivos Específicos**

- Analizar el proceso de cultivo actual que desarrolla la empresa en el entorno hidropónico.
- Seleccionar el hardware requerido para medir y controlar las variables deseadas en el sistema hidropónico.
- Diseñar los programas lógicos y de interfaz para el sistema.
- Validar el sistema diseñado mediante pruebas que permitan verificar la funcionalidad y el cumplimiento de los parámetros deseados.

## 1.5 Estructura del documento

La estructura del documento presentado se divide en 10 capítulos, en los cuales se desarrolla el proceso de diagnóstico, diseño y validación para un dispositivo de medición y dosificación en el cultivo de plantas hidropónicas. El capítulo 2 consiste en el marco teórico, el cual explica los conceptos relevantes para poder entender el problema y los detalles de la solución. El capítulo 3 describe la metodología empleada aplicada al proyecto. Luego se encuentra el capítulo 4, en el cual se presenta el proceso de diseño que da como resultado la combinación del concepto ganador. En el capítulo 5 se expone el diseño de la solución para el dispositivo de medición y dosificación. En el capítulo 6 se presentan los resultados y el análisis de estos. Después, el capítulo 7 cita las conclusiones y recomendaciones del proyecto, en conjunto con descripciones de trabajo a futuro. En el capítulo 8 se muestran las referencias bibliográficas, y en los capítulos 9 y 10 se exhiben los Apéndices y Anexos respectivamente.

# Capítulo 2. Marco Teórico

En este capítulo se incluyen todos los conceptos teóricos relevantes y afines al proyecto. Se asume que la audiencia lectora cuenta con un conocimiento elemental o básico de los temas del proyecto. Por esta razón se describen los conceptos relevantes y necesarios, pero que no son fundamentales o elementales.

## 2.1 Hidroponía Conceptos básicos

### 2.1.1 Tipos de sistemas hidropónicos

La hidroponía, como método de cultivo, presenta diversas opciones de sistemas que se pueden implementar que permiten un crecimiento de las plantas a través del uso de soluciones nutritivas, que normalmente es acuoso. Los principales tipos de sistemas hidropónicos se clasifican según su mecanismo de funcionamiento, y se describen a continuación.

Uno de los sistemas más simples es el sistema de solución nutritiva estática, donde las raíces de las plantas están inmersas en una solución que no fluye. Este método es fácil de implementar, pero requiere un monitoreo constante de los niveles de oxígeno en el agua para evitar que las raíces se asfixien [5].

El Sistema de Película Nutritiva (NFT) es un sistema que permite que una película delgada de solución nutritiva fluya continuamente sobre las raíces de las plantas. Esto es algo ideal para cultivos de hojas verdes principalmente, ya que maximiza la oxigenación y evita la acumulación de sales en las raíces. [6]

El Sistema de Raíz Flotante (DWC) sumerge las raíces en una solución nutritiva oxigenada de manera constante. Este sistema es adecuado para plantas de crecimiento rápido, que necesiten volúmenes grandes de agua, como lechuga y espinaca, por ejemplo, proporcionando un acceso continuo a nutrientes y oxígeno. [7]

El sistema de Aeroponía es uno de los más interesantes. En este se suspenden las raíces en el aire y se rocían con una solución nutritiva en forma de niebla. Este sistema es

avanzado y se utiliza principalmente para cultivos de alta calidad, lo cual permite un crecimiento rápido gracias a la excelente oxigenación. [8]

El Sistema de Mecha es uno de los sistemas más simples y económicos. En él una mecha transporta los nutrientes desde un depósito hasta las raíces mediante acción capilar. Este sistema se usa principalmente para plantas pequeñas y de bajo consumo de agua, como hierbas y plantas ornamentales. [9]

### **2.1.2 Propagación y trasplante**

El proceso de propagación y trasplante en cultivos hidropónicos comienza con la germinación de las semillas, generalmente en un medio de cultivo estéril y sin suelo, como la lana de roca o turba, que proporciona un ambiente controlado para el desarrollo inicial de las plántulas. Una vez que las semillas germinan y las plántulas desarrollan un sistema de raíces adecuado, se trasladan a un sistema hidropónico donde las raíces están en contacto con una solución nutritiva balanceada que proporciona los nutrientes esenciales para el crecimiento. Cabe destacar que la propagación puede realizarse por clonación de igual manera, pero no es algo común.

Durante la etapa de trasplante, es fundamental mantener las raíces húmedas y asegurar que las plántulas no sufran estrés hídrico ni daños mecánicos. Los sistemas de trasplante pueden variar dependiendo del tipo de sistema hidropónico utilizado, como NFT o raíz flotante que se describieron previamente. El proceso de trasplante se completa cuando las plántulas se colocan en sus posiciones definitivas dentro del sistema, donde continuarán su desarrollo hasta la cosecha [10]. En esta fase, se asegura que la planta tenga acceso constante a agua, nutrientes y oxígeno, factores cruciales para un crecimiento saludable y rápido [5].

### **2.1.3 pH y EC**

El pH es un factor fundamental en los cultivos hidropónicos, ya que influye directamente en la disponibilidad de los nutrientes esenciales para las plantas. En general, el rango ideal de pH para la mayoría de los cultivos hidropónicos oscila entre 5.5 y 6.5. Fuera

de este rango, la absorción de nutrientes como el hierro, el fósforo y el magnesio puede verse afectada, lo que puede llevar a deficiencias o toxicidades [5]. Un pH elevado puede causar la precipitación de nutrientes, mientras que un pH bajo aumenta la solubilidad de algunos metales, lo que puede resultar perjudicial para las plantas. Es crucial el monitoreo constante del pH en la solución nutritiva, utilizando dispositivos de medición precisos y soluciones tampón para corregir las desviaciones [11].

La conductividad eléctrica (EC), por su parte, mide la concentración de sales disueltas en la solución nutritiva, proporcionando una indicación de la cantidad de nutrientes disponibles. Los valores ideales de EC varían según el tipo de cultivo, pero generalmente se mantienen entre 1.5 y 2.5 mS/cm. Una EC demasiado alta indica una concentración excesiva de sales que puede causar estrés osmótico en las plantas, impidiendo la absorción adecuada de agua. Por otro lado, una EC baja señala una deficiencia de nutrientes que puede ralentizar el crecimiento de las plantas [12]. El monitoreo constante de la EC asegura que las plantas reciban los nutrientes necesarios en la cantidad correcta.

En cuanto a las normas internacionales, es importante seguir regulaciones como la ISO 22000, que establece lineamientos para la seguridad y gestión de calidad en la producción agrícola, incluyendo el monitoreo y control de parámetros como el pH y la EC. Además, la FAO y las Buenas Prácticas Agrícolas (GAP) recomiendan prácticas sostenibles que incluyen el uso eficiente de fertilizantes y agua, garantizando la producción de alimentos de manera segura y respetuosa con el medio ambiente [13]. Estas normas aseguran un manejo adecuado de los recursos hídricos y nutricionales en sistemas hidropónicos, contribuyendo a la sostenibilidad del proceso.

#### **2.1.4 Iluminación**

La iluminación juega un papel fundamental en el crecimiento y desarrollo de las plantas en los sistemas de cultivo hidropónico, ya que proporciona la energía necesaria para la fotosíntesis. En entornos controlados, como los invernaderos o cultivos de interior, las fuentes de luz artificial, como los LEDs (diodos emisores de luz), son ampliamente utilizadas debido a su eficiencia energética y capacidad de proporcionar espectros específicos de luz.

Las plantas requieren principalmente luz en los espectros azul y rojo para optimizar el crecimiento vegetativo y la floración, respectivamente [14]. Los sistemas LED permiten ajustar la longitud de onda de la luz emitida, lo que se traduce en un crecimiento más controlado y eficiente, reduciendo el consumo energético y aumentando la productividad del cultivo. Además, al no emitir calor excesivo, los LEDs minimizan el riesgo de estrés térmico en las plantas, lo que es crucial en sistemas hidropónicos donde el ambiente debe ser estrictamente controlado [15].

El fotoperiodo, o la duración de la exposición a la luz, también es un factor clave en el crecimiento de las plantas. Diferentes especies vegetales responden de manera distinta a los ciclos de luz y oscuridad, por lo que es esencial ajustar el fotoperiodo según las necesidades del cultivo. Para plantas de día largo, un mayor número de horas de luz favorece la floración, mientras que las plantas de día corto requieren menos horas de luz para florecer adecuadamente. En cultivos hidropónicos, es común utilizar ciclos de luz artificial de 16 a 18 horas de luz por día para maximizar el crecimiento [16]. La gestión adecuada de la iluminación, siguiendo normas como las establecidas por la FAO en cuanto a la eficiencia energética y la calidad de la luz, es crucial para lograr una producción sostenible y de alta calidad en sistemas hidropónicos [17].

### **2.1.5 Temperatura y humedad**

La temperatura y la humedad son factores cruciales en el éxito de los cultivos hidropónicos, ya que influyen directamente en el crecimiento, la absorción de nutrientes y la salud general de las plantas. La temperatura óptima para la mayoría de los cultivos hidropónicos oscila entre 18°C y 24°C durante el día, con una ligera reducción durante la noche para simular el ambiente natural de crecimiento [18]. Temperaturas superiores a este rango pueden generar estrés en las plantas, reducir la absorción de nutrientes y aumentar la transpiración, lo que puede llevar a un desequilibrio en la hidratación de las plantas. Por el contrario, temperaturas demasiado bajas pueden ralentizar los procesos metabólicos, incluyendo la fotosíntesis y la absorción de agua, lo que a su vez reduce la tasa de crecimiento [19]. El control de la temperatura en los sistemas hidropónicos, especialmente en ambientes

cerrados como invernaderos o cultivos verticales, se maneja mediante sistemas de calefacción, refrigeración y ventilación para mantener condiciones óptimas.

La humedad relativa también desempeña un papel vital en los cultivos hidropónicos, ya que afecta la transpiración y el intercambio de gases en las plantas. En términos generales, una humedad relativa entre 50% y 70% es ideal para la mayoría de los cultivos hidropónicos [20]. Niveles de humedad más altos pueden aumentar el riesgo de enfermedades fúngicas debido a la condensación en las hojas y en las superficies de cultivo, mientras que niveles de humedad demasiado bajos pueden acelerar la transpiración, obligando a las plantas a absorber más agua y, en algunos casos, dificultando la absorción de ciertos nutrientes. Para mantener un control adecuado de la humedad, es común utilizar deshumidificadores en sistemas cerrados y asegurarse de que haya una ventilación adecuada, evitando la acumulación de humedad en el entorno de cultivo [21].

### **2.1.6 Ventilación y CO<sub>2</sub>**

La ventilación y la concentración de CO<sub>2</sub> son aspectos esenciales en los sistemas de cultivo hidropónico, ya que influyen directamente en la fotosíntesis y el crecimiento de las plantas. Una ventilación adecuada asegura el intercambio constante de aire, eliminando el exceso de humedad y calor, al tiempo que introduce aire fresco, lo cual es crucial para evitar la acumulación de patógenos y garantizar un ambiente estable para el cultivo [22]. En ambientes controlados, como invernaderos o cultivos de interior, se utilizan sistemas de ventilación forzada que mantienen la temperatura y la humedad en niveles óptimos, además de asegurar una distribución uniforme del dióxido de carbono.

El CO<sub>2</sub> es indispensable para la fotosíntesis, y su concentración en el aire influye directamente en la tasa de crecimiento de las plantas. La concentración natural de CO<sub>2</sub> en el aire es de aproximadamente 400 ppm, pero en sistemas hidropónicos se puede aumentar hasta 1,000-1,200 ppm para optimizar el crecimiento de las plantas, siempre que se mantengan niveles adecuados de luz y nutrientes [23]. El enriquecimiento de CO<sub>2</sub>, combinado con una ventilación eficiente, puede mejorar significativamente la productividad del cultivo al

acelerar la tasa fotosintética, siempre que los demás factores ambientales estén bien controlados [24].

### **2.1.7 Recirculación y oxigenación del Agua**

La recirculación del agua es una técnica clave en los sistemas hidropónicos que permite reutilizar la solución nutritiva, reduciendo el desperdicio de agua y optimizando el uso de los nutrientes. En estos sistemas, la solución nutritiva se bombea continuamente para asegurar que las raíces de las plantas estén siempre en contacto con el agua enriquecida de nutrientes. Este proceso no solo minimiza el consumo de agua, sino que también contribuye a un mejor control de la concentración de nutrientes y el pH en el sistema [25]. La recirculación debe ser gestionada cuidadosamente para evitar la acumulación de sales o desequilibrios en los nutrientes, los cuales pueden afectar negativamente el crecimiento de las plantas. Las normativas internacionales, como las de la FAO, recomiendan un monitoreo continuo y el tratamiento adecuado del agua recirculada para prevenir problemas como la proliferación de patógenos [26].

La oxigenación del agua es igualmente crucial en el proceso hidropónico, ya que las raíces de las plantas requieren oxígeno para la respiración celular. En sistemas como la técnica de película de nutrientes (NFT) o sistemas de raíz flotante, el oxígeno se disuelve en la solución nutritiva mediante aireadores o inyectoros de oxígeno [27]. Niveles bajos de oxígeno disuelto pueden conducir a la asfixia de las raíces, lo que reduce la absorción de nutrientes y el crecimiento de las plantas. Se recomienda mantener niveles de oxígeno disuelto por encima de 6 ppm para un crecimiento óptimo [28]. La recirculación eficiente, junto con la adecuada oxigenación, son componentes esenciales para garantizar la salud de las plantas y maximizar el rendimiento en los sistemas hidropónicos.

### **2.1.8 Cosecha**

El proceso de cosecha en sistemas hidropónicos difiere de los métodos tradicionales principalmente debido a la ausencia de suelo y el control preciso de las condiciones de crecimiento. En un sistema hidropónico, las plantas pueden alcanzar su madurez más rápidamente, gracias a la disponibilidad constante de nutrientes y agua, lo que permite

múltiples ciclos de cosecha al año. La cosecha se realiza una vez que la planta ha alcanzado su tamaño o nivel de madurez óptimo, lo cual varía dependiendo del tipo de cultivo. Los vegetales de hoja, como la lechuga y las espinacas, suelen cosecharse cuando alcanzan un desarrollo adecuado, lo que puede ocurrir entre 30 y 40 días después de la siembra, mientras que otros cultivos, como los tomates o los pimientos, requieren un tiempo de maduración más prolongado [5]. Es esencial evitar daños mecánicos durante la cosecha, ya que las plantas cultivadas en sistemas hidropónicos son generalmente más frágiles debido a la estructura de soporte liviana que utilizan.

Otro aspecto importante en la cosecha hidropónica es el manejo post-cosecha. Debido a que las plantas hidropónicas no están expuestas a las mismas enfermedades del suelo que los cultivos tradicionales, tienden a tener una vida útil más larga. Sin embargo, es fundamental mantener las condiciones de almacenamiento adecuadas, como temperatura y humedad controlada, para evitar la pérdida de calidad y nutrientes. Los estándares internacionales, como las Buenas Prácticas Agrícolas (GAP) y las normas establecidas por la FAO, sugieren métodos eficientes para manejar la cosecha y el post-cosecha en cultivos hidropónicos, asegurando que los productos mantengan su frescura y valor nutritivo [21]. El uso de sistemas automatizados en la cosecha también se está implementando en algunas instalaciones, optimizando la eficiencia y reduciendo el tiempo de manejo.

### **2.1.9 Limpieza**

La limpieza y desinfección en los sistemas de cultivo hidropónico son esenciales para prevenir la acumulación de patógenos, algas y residuos de nutrientes que pueden afectar la salud de las plantas y la eficiencia del sistema. Dado que los cultivos hidropónicos dependen de un entorno controlado sin suelo, cualquier contaminación en el agua o en los componentes del sistema puede propagarse rápidamente, causando enfermedades como la podredumbre de las raíces o el mildiu [29]. Es crucial realizar una limpieza regular de los tanques de nutrientes, tuberías, bombas y otros componentes, utilizando soluciones desinfectantes como peróxido de hidrógeno o hipoclorito de sodio, que eliminan las bacterias y hongos sin dejar residuos dañinos para las plantas [30]. También es importante enjuagar los sistemas después de la aplicación de productos químicos para evitar cualquier acumulación de toxinas.

Además, se deben limpiar o reemplazar los sustratos de cultivo (si se utilizan) entre ciclos de cultivo para eliminar cualquier residuo de nutrientes o patógenos que puedan haberse acumulado durante el proceso de crecimiento. El uso de agua limpia y tratada es fundamental, y la FAO y otras normativas internacionales sugieren el monitoreo continuo de la calidad del agua, asegurando que esté libre de contaminantes [21]. De esta manera, una limpieza adecuada no solo previene enfermedades, sino que también optimiza la absorción de nutrientes por parte de las plantas, garantizando un crecimiento saludable y sostenible. La limpieza debe formar parte de un programa de Buenas Prácticas Agrícolas (GAP), que garantiza la seguridad y eficiencia en la producción hidropónica.

## 2.2 Medición de variables

Como uno de los puntos principales en la solución se tiene la parte del sistema de medición. Este debe ser un sistema automático, que pueda tomar lecturas periódicas de las variables ambientales de interés. Concretamente, se tienen el pH y la EC como variables principales a medir. Es muy importante poder definir la periodicidad de las mediciones, ya que dependiendo del tiempo que pueda ser invertido por el personal para la parte hidropónica esto permitiría un mayor control a la hora de regular estos valores.

De manera general, el proceso de medición de variables en un sistema de ingeniería implica la adquisición de datos a través de sensores o instrumentos que capturan valores cuantitativos de parámetros físicos, químicos o eléctricos. [31] Estas señales se procesan y, a menudo, se amplifican y filtran para eliminar ruidos, asegurando una lectura precisa y adecuada. Muchas veces las señales se digitalizan con ayuda un convertidor analógico-digital o ADC para ser procesadas y analizadas en sistemas de control o monitoreo, los cuales son generalmente digitales [32]. Es fundamental que los instrumentos de medición sean calibrados regularmente para garantizar la exactitud y precisión de los datos, siguiendo normas internacionales como las establecidas por el National Institute of Standards and Technology (NIST) y la ISO 9001, que garantizan la trazabilidad de las mediciones [33].

## 2.3 Dosificación de variables

Tanto para el pH como para la EC se tienen dos procesos, el de medición, y el de dosificación. El pH y la EC se miden cada día de forma manual. Cuando los valores de pH están fuera de cierto rango se debe de aplicar una sustancia correctora. Igualmente, con respecto a la EC. Conforme pasa el tiempo los niveles de EC bajan, los cuales deben de ser repuestos mediante una dosificación.

Las sustancias por administrar en la reserva circulante de agua son todas líquidas. Algunas requieren de una dosis relativamente pequeña, y otras de una dosis mucho mayor. Esto hace que el proceso de dosificación sea fácil de diseñar ya que se podría utilizar el mismo mecanismo para las tres sustancias, pero al mismo tiempo se debe considerar un sistema con una capacidad adecuada para cumplir con las cantidades requeridas. Las dosificaciones deben ocurrir cuando los valores medidos para las variables se salgan de los rangos aceptables.

## 2.4 Procesamiento de señales

El procesamiento de señales es el conjunto de técnicas y métodos empleados para analizar, modificar o extraer información útil de una señal, ya sea analógica o digital. Dependiendo de la aplicación, se pueden emplear técnicas como el filtrado para mejorar la calidad de la señal, u obtener componentes de frecuencias más bajas en la señal; o la compresión para reducir la cantidad de datos. Finalmente, los datos procesados se utilizan para control, visualización o almacenamiento. En el caso específico de señales de sensores, se suelen procesar para interpretar mediciones físicas, que típicamente se miden en forma de un voltaje analógico, y convertirlas en datos digitales comprensibles por sistemas de control o de análisis. Este procesamiento puede implicar filtrado, amplificación y conversión de señales analógicas a digitales. [34]

El filtro de mediana es una técnica de procesamiento de señales no lineal utilizada para reducir el ruido en datos, especialmente eficaz en la eliminación de picos o valores atípicos. Funciona desplazando una ventana móvil sobre la señal y reemplazando el valor central por la mediana de los valores en esa ventana. Al hacerlo, el filtro preserva las

características importantes de la señal, como los bordes y las transiciones, mientras elimina el ruido impulsivo sin suavizar o cambiar excesivamente la tendencia de los datos. Este enfoque es ideal para señales de sensores expuestas a interferencias esporádicas o ruidos impulsivos, lo que hace que el filtro de mediana sea ampliamente utilizado en aplicaciones como el procesamiento de imágenes y la medición de señales en sistemas embebidos [35].

El filtro de media móvil es un método lineal que suaviza las fluctuaciones rápidas en una señal calculando el promedio de los valores dentro de una ventana que se desplaza a lo largo de la señal. Esto reduce el ruido de alta frecuencia y mejora la claridad de las tendencias subyacentes en los datos de un sensor. Aunque este filtro es simple y efectivo para señales con ruido gaussiano, puede suavizar las transiciones bruscas y no es tan robusto frente a valores atípicos como el filtro de mediana. Sin embargo, debido a su simplicidad computacional y buena capacidad para eliminar el ruido suave, es una opción adecuada en muchos sistemas de medición de sensores [36].

## 2.5 Interfaz Gráfica y Experiencia de Usuario (UX/UI)

La UX (User Experience) y la UI (User Interface) son conceptos interrelacionados pero distintos en el diseño de sistemas y aplicaciones interactivas. Generalmente es un concepto muy utilizado en el desarrollo de aplicaciones. La UX se refiere a la experiencia global del usuario al interactuar con un producto o sistema, y abarca aspectos como la facilidad de uso, accesibilidad, eficiencia y satisfacción. El objetivo principal de la UX es crear productos que ofrezcan una interacción intuitiva y fácil, optimizando todos los puntos de contacto del usuario con el sistema [37]. Para lograr una buena UX, se puede realizar un análisis profundo del comportamiento del usuario y se tiende a emplear metodologías como el diseño centrado en el usuario (UCD) y pruebas de usabilidad, que permiten ajustar el diseño en función de las necesidades y expectativas del usuario final [38].

Por otro lado, la UI se refiere a la capa visual y estructural a través de la cual los usuarios interactúan con el sistema. Involucra el diseño de elementos gráficos, botones, menús, y la disposición visual de la información. Una buena UI debe ser atractiva visualmente y coherente, asegurando que la interfaz sea clara y fácil de navegar [39]. Aunque

la UI es una parte importante de la UX, un diseño de UI visualmente atractivo no garantiza una buena experiencia de usuario si no se acompaña de una estructura que facilite la interacción. La integración adecuada de UX y UI es esencial para desarrollar productos que no solo funcionen bien, sino que también sean agradables de usar. Se siguen principios de diseño como los establecidos en la ISO 9241-210 principalmente a la hora de diseñar sistemas UX/UI [40].

## 2.6 Comunicación IOT

El Internet de las Cosas (IoT) es una red de dispositivos interconectados que pueden recolectar, intercambiar y actuar sobre datos mediante sensores, actuadores y otros componentes. Estos dispositivos, que pueden incluir desde electrodomésticos hasta maquinaria industrial, están equipados con tecnologías que les permiten comunicarse entre sí y con sistemas centrales a través de internet. El objetivo del IoT es automatizar procesos y mejorar la eficiencia en diversas aplicaciones, como el hogar inteligente, la agricultura, la salud y la industria [41]. La recopilación de datos en tiempo real y la capacidad de análisis proporcionan a los usuarios la posibilidad de tomar decisiones más informadas. Sin embargo, el diseño eficiente del IoT depende de protocolos de comunicación ligeros y efectivos, dada la limitación de recursos en muchos dispositivos conectados.

Uno de los protocolos más utilizados en el IoT es el MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). MQTT es un protocolo de mensajería ligero diseñado para dispositivos con recursos limitados y redes de baja capacidad. Funciona bajo un modelo de publicación/suscripción, donde los dispositivos se comunican a través de un broker central que gestiona los mensajes entre los dispositivos que publican (envían datos) y los que están suscritos (reciben datos) a ciertos "temas" específicos [42]. Este protocolo es ideal para aplicaciones IoT debido a su bajo consumo de ancho de banda, fiabilidad en condiciones de conectividad inestable, y su capacidad para funcionar en redes con alta latencia o pérdidas de paquetes, lo que lo hace ampliamente utilizado en aplicaciones como la automatización del hogar, monitoreo remoto y la telemetría industrial.

## 2.7 VPN

Una VPN (Virtual Private Network) es una tecnología que permite crear una conexión segura y cifrada sobre una red pública, como Internet, proporcionando privacidad y anonimato a los usuarios. Al utilizar una VPN, los datos del usuario se transmiten a través de un túnel cifrado. Este túnel protege la información de posibles interceptaciones por parte de terceros. Esta tecnología es ampliamente utilizada en empresas para permitir a los empleados acceder de manera remota a recursos internos de forma segura, así como por individuos que buscan proteger su privacidad en redes públicas o evitar restricciones geográficas al acceder a contenido en línea [43]. La VPN actúa redirigiendo el tráfico del usuario a través de un servidor VPN, lo que cambia la dirección IP visible y oculta la ubicación real del usuario.

Desde un punto de vista técnico, una VPN utiliza protocolos como IPsec (Internet Protocol Security) o SSL/TLS (Secure Sockets Layer/Transport Layer Security) para asegurar la conexión entre el dispositivo del usuario y el servidor VPN. Estos protocolos garantizan la autenticidad y confidencialidad de los datos transmitidos a través de la red pública. [44]

## 2.8 Protección IP

La protección IP (Ingress Protection), también conocida como código IP, es un estándar definido por la IEC 60529 que clasifica y evalúa el grado de protección proporcionado por un dispositivo contra la intrusión de objetos sólidos y líquidos. El código IP se representa por dos números: el primero indica el nivel de protección contra sólidos (como polvo o partículas), y el segundo número especifica la protección contra líquidos (como agua). Por ejemplo, un dispositivo con clasificación IP67 está completamente protegido contra la entrada de polvo (primer número 6) y puede resistir la inmersión en agua a una profundidad de hasta 1 metro durante 30 minutos (segundo número 7) [45]. Este sistema de clasificación es fundamental para garantizar la seguridad y durabilidad de los dispositivos en entornos industriales o al aire libre, donde el polvo y el agua pueden afectar su funcionamiento.

La protección IP es particularmente importante en aplicaciones de electrónica de consumo, dispositivos industriales y sistemas de automatización, donde se requiere garantizar que los componentes internos no se vean comprometidos por las condiciones ambientales. Por ejemplo, en dispositivos IoT (Internet of Things), como sensores y actuadores expuestos a la intemperie, contar con una adecuada clasificación IP asegura su resistencia y fiabilidad a largo plazo [46]. Además, este sistema de clasificación es ampliamente utilizado en industrias que requieren equipos resistentes a condiciones adversas, como la minería, el transporte y la agricultura, donde la protección contra polvo y agua es crítica para el funcionamiento continuo y seguro.

## *Capítulo 3. Metodología*

En este capítulo se describe la metodología utilizada para este proyecto de ingeniería. Se exponen los pasos por seguir para llegar a solucionar el problema de la empresa por medio de un planteamiento ingenieril.

### 3.1 Descripción General

Se empleó la metodología propuesta por Ulrich y Eppinger [47] para abordar el desarrollo del proyecto y encontrar una solución efectiva para el problema planteado. Esta elección se basa en la necesidad de utilizar un enfoque de diseño ingenieril que guíe el logro de los objetivos establecidos a lo largo de una serie de etapas, las cuales se detallan a continuación.

La primera fase implica el inicio de la comunicación con el cliente y un análisis exhaustivo de todas sus declaraciones. Este proceso permitió estudiar la información proporcionada, identificar posibles sesgos y definir con precisión el problema que el proyecto aborda, así como determinar la causa raíz que se busca solucionar. Esto fue planteado en el capítulo anterior. Seguidamente, se procedió a establecer un conjunto de necesidades que reflejan tanto los atributos deseados por el cliente como la descripción funcional del producto final. Estas necesidades se organizaron en una jerarquía y se les asignó una importancia relativa, con el fin de priorizarlas y guiar el desarrollo del proyecto de manera efectiva.

Seguidamente, se procedió a traducir las necesidades identificadas en especificaciones concretas que vinculan los requisitos del cliente con una serie de métricas que permiten cuantificar el grado de cumplimiento de cada necesidad. Estableciendo valores objetivo para estas métricas, se estableció un marco para verificar que la solución propuesta satisfaga de manera efectiva los objetivos del proyecto. Posteriormente, se adentra en la fase de conceptualización, donde se generaron ideas potenciales como posibles soluciones al problema planteado. Es importante destacar que, hasta este punto en la metodología, no se propusieron soluciones específicas para el problema, ya que omitir cualquiera de los pasos previos necesarios podría resultar en la omisión de información crucial. Inicialmente, se

presentó el sistema propuesto como un modelo de caja negra, donde se definieron de manera tentativa las entradas y salidas de materiales, información y energía. Este modelo se descompuso en subproblemas, de modo que al resolver cada uno de ellos se pudo proporcionar una solución integral al problema en cuestión. [47]

Luego, se inició una investigación del estado actual de la industria y fuentes de información en relación con cada uno de los subproblemas identificados, con el propósito de obtener conceptos y enfoques para abordar las funciones requeridas. Esta investigación se llevó a cabo tanto a nivel externo como interno. Esto implica consultar diversas fuentes, como literatura especializada, artículos científicos, patentes y recurrir a la experiencia de expertos en el campo. Además de estas fuentes convencionales, se emplearon técnicas de generación de ideas, como sesiones de lluvia de ideas, para capitalizar el conocimiento, habilidades y experiencia personal del equipo involucrado en el proyecto.

Se llevó a cabo una clasificación meticulosa de todos los conceptos generados, con el fin de proporcionar una comprensión clara de aquellos que han sido explorados de manera insuficiente, aquellos que no justifican una exploración adicional y aquellos que se consideran adecuados para un análisis más profundo. A partir de estos últimos, se procedió a realizar combinaciones de conceptos que den origen a múltiples soluciones candidatas, ampliando así el espectro de posibilidades para abordar el problema planteado.

Estas soluciones se sometieron a una evaluación exhaustiva basada en una serie de criterios de selección derivados de las necesidades del cliente y las especificaciones del proyecto. El objetivo fue comparar los puntos fuertes y débiles de los diferentes candidatos para discernir aquellos que presenten un mayor potencial y proceder con su posterior investigación, prueba o desarrollo. Es importante destacar que, durante el proceso de filtrado y evaluación, es posible identificar más de un candidato potencial, e incluso existe la opción de combinar características de diferentes candidatos para obtener la solución óptima. También se contempló la posibilidad de mejorar un candidato por sí solo para alcanzar los estándares deseados. [47]

Una vez identificadas las soluciones preferidas, se llevaron a cabo pruebas de concepto para validar su conformidad con los valores objetivo definidos en las especificaciones del diseño, asegurando así que satisfagan las necesidades del cliente y se

consideren exitosas. Este proceso de validación se llevó a cabo mediante una serie de pruebas diseñadas intencionalmente y con objetivos claros. Los resultados obtenidos se sometieron a un análisis para determinar la viabilidad y eficacia de la solución propuesta. Es importante destacar que este proceso es iterativo, lo que significa que en cualquier punto del ciclo de diseño se puede retroceder a etapas anteriores para realizar ajustes y mejoras según sea necesario. Con respecto a los resultados de este proyecto se plantean oportunidades de mejora en las recomendaciones que dan lugar a una segunda iteración mejorada del sistema.

Posteriormente, se tiene una sección de estudio o análisis económico como tal. Esto con el fin de mostrar el beneficio de la solución diseñada a través de diferentes indicadores económicos. Esto puso en perspectiva los procesos involucrados sin la utilización de la solución, y la diferencia que se presenta cuando si se implementa la solución. Se convirtieron las variables en cuestión en valores monetarios para tener una forma de comparación de más fácil entendimiento.

## 3.2 Desarrollo de la metodología

El proyecto se desarrolló en las cinco etapas conforme a la metodología explicada anteriormente, iniciando en el mes de julio y finalizando para el mes de noviembre del 2024. El proceso metodológico aplicado al proyecto se detalla en la figura 3.1 y la tabla 3.1.



**Figura 3.1.** Proceso metodológico aplicado al proyecto [Elaboración Propia].

**Tabla 3.1.** Marco Metodológico Aplicado al Proyecto [Elaboración Propia]

Etapa	Objetivo	Actividades	Herramientas	Productos Esperados
Determinación de Necesidades	Entender de manera clara y precisa las necesidades y expectativas del cliente para guiar el desarrollo del producto.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recopilación de datos</li> <li>• Interpretar datos en forma de necesidades</li> <li>• Jerarquización de necesidades</li> <li>• Asignar importancia relativa</li> <li>• Reflexión de resultados y el proceso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entrevistas</li> <li>• Encuestas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lista de necesidades</li> <li>• Importancia relativa de cada necesidad</li> <li>• Jerarquía de necesidades</li> </ul>
Especificaciones del producto	Definir y documentar los requisitos técnicos y funcionales que el producto debe cumplir para satisfacer las necesidades del cliente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elaborar lista de métricas</li> <li>• Establecer los valores objetivo</li> <li>• Reflexión sobre el proceso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tablas organizacionales</li> <li>• Búsqueda de información</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Métricas para las necesidades adecuadas</li> <li>• Valores objetivo para cada Métrica</li> </ul>
Conceptualización del proceso de diseño	Simplificar el planteamiento del problema realizando una simplificación de este, además de generar y explorar una variedad de conceptos que conllevan a posibles soluciones.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• División en subproblemas</li> <li>• Búsqueda de conceptos</li> <li>• Organización y combinación de conceptos</li> <li>• Reflexión del proceso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diagrama de bloques</li> <li>• Tablas organizacionales</li> <li>• Árbol de clasificación</li> <li>• Tabla de combinación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descomposición funcional del problema</li> <li>• Conceptos de solución para cada subproblema</li> <li>• Posibles soluciones compuestas de múltiples conceptos</li> </ul>

<p style="text-align: center;"><b>Selección y Evaluación de Conceptos</b></p>	<p>Comparar y analizar las diferentes combinaciones de conceptos propuestos para determinar cuál cumple mejor con las especificaciones del producto y ofrece la mayor viabilidad y valor para el cliente</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fase de Filtrado</li> <li>• Fase de Selección</li> <li>• Reflexión del proceso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Matrices de filtrado</li> <li>• Tablas de combinación</li> <li>• Matrices de selección</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Número reducido de soluciones en la parte de filtrado</li> <li>• Una solución ganadora para la parte de selección</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Evaluación y Prueba de Conceptos</b></p>	<p>Validar y verificar los conceptos seleccionados mediante pruebas y análisis para asegurar que cumplan con los requisitos técnicos y las expectativas del cliente</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definición de variables de muestra y establecimiento de factores de influencia</li> <li>• Definición de las pruebas a realizar</li> <li>• Reflexión del proceso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tablas de experimentos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lista de pruebas</li> </ul>

## *Capítulo 4. Propuesta de Diseño*

En este capítulo se procede a desarrollar la metodología de trabajo expuesta en el capítulo anterior (Ulrich Eppinger) a la realidad de la empresa y del proyecto. Como producto final de este segmento del informe se tiene la obtención del concepto ganador desarrollado para solucionar el problema en cuestión.

### 4.1 Determinación de Necesidades

En la fase 1, o la fase de determinación de necesidades se determinó lo que debe cumplir la solución para ser considerada como válida. Existen cinco pasos principales. Primero se recopilamos los datos sin procesar del cliente, en una entrevista, luego de esto se interpretaron los datos en términos de necesidades del cliente para organizar las necesidades en una jerarquía y establecer la importancia relativa de estas para finalmente analizar sobre los resultados y el proceso. [47]

#### **4.1.1 Recopilación de datos**

Con el fin de comprender la naturaleza del entorno y del problema se contactó de manera directa con el cliente para hablar sobre el proyecto. A partir de esta primera conversación se plantearon distintas preguntas que serían hechas durante una posterior entrevista al cliente con el objetivo de obtener las necesidades del cliente. Estas preguntas se evidencian en el Apéndice 9.7. A la hora de realizar las preguntas se procuró no sesgar las respuestas, y ser receptivo a toda la información brindada. Esto se realizó principalmente por medio de preguntas abiertas y neutrales, de escucha activa, y de clarificaciones en caso de no quedar clara alguna respuesta.

#### **4.1.2 Interpretar datos en forma de necesidades**

Para procesar los datos obtenidos, se procedió a analizar los apuntes de la entrevista, para así poder identificar las necesidades del cliente. Se procesó la información tomando en

cuenta lo que el producto tiene que hacer, y no como debe hacerlo [47]. A continuación, en la tabla 4.1.1 se muestran las necesidades interpretadas del cliente.

**Tabla 4.1.1.** Lista de necesidades formuladas [Elaboración Propia]

Numero	Necesidad
1	La máquina toma los datos de pH del agua de manera correcta.
2	La máquina toma los datos de EC del agua de manera correcta.
3	Las mediciones se realizan de manera periódica.
4	El dispositivo tiene una precisión suficiente.
5	El sistema mide la temperatura del agua.
6	El sistema guarda el clima de la zona.
7	La máquina mide el nivel del agua del tanque.
8	El dispositivo controla el pH por medio de dosificación con la dosis adecuada.
9	El sistema controla la EC por medio de dosificación con la dosis adecuada.
10	El dispositivo realiza las dosificaciones cuando sean requeridas.
11	La máquina opera de manera rápida.
12	La máquina opera automáticamente sin intervención del usuario.
13	La máquina es fácil de limpiar.
14	La máquina opera de forma normal para el rango de temperatura del establecimiento.
15	El sistema opera adecuadamente para condiciones de humedad altas.
16	La máquina se puede mover de lugar con facilidad.
17	La máquina es pequeña.
18	La máquina funciona con un voltaje de tomacorrientes estándar.
19	La máquina tiene un HMI visual.
20	La máquina se conecta con el ecosistema de home del establecimiento.
21	La máquina guarda los datos de manera digital.
22	La máquina da una notificación para informar sobre datos atípicos.
23	El sistema muestra los datos medidos y sus graficas

24	La máquina es económica de producir.
25	La máquina tiene un bajo impacto ambiental.
26	La máquina es replicada fácilmente.
27	La máquina se repara con repuestos de fácil obtención.
28	El sistema es escalable a futuro.

### 4.1.3 Jerarquización de necesidades

Como siguiente paso se realiza la jerarquización de necesidades. Debido al número de necesidades interpretadas se considera considerar únicamente las necesidades primarias y secundarias. Con la información de la tabla 4.1.1 se procede a generalizar los conceptos de algunas de las necesidades para verificar cuales están relacionadas, y agruparlas en necesidades primarias según su naturaleza. A continuación, en la tabla 4.1.2 se evidencia la jerarquización de necesidades.

**Tabla 4.1.2.** Lista de necesidades jerarquizadas [Elaboración Propia]

Necesidad Primaria	Necesidad Secundaria
Medición	La máquina toma los datos de pH del agua.
	La máquina toma los datos de EC del agua.
	Las mediciones se realizan de manera periódica. (Ligado al volumen de agua, intervalo definido por el usuario, caso específico ciclo de agua de 40 min, balance entre generar muchos datos, cada hora)
	El dispositivo tiene una precisión suficiente. (Incertidumbre de dispositivos de medición de producción).
	El sistema mide la temperatura del agua.
	El sistema guarda el clima de la zona.
	La máquina mide el nivel del agua del tanque.

Dosificación	El dispositivo controla el pH por medio de dosificación con la dosis adecuada.
	El sistema controla la EC por medio de dosificación con la dosis adecuada.
	El dispositivo realiza las dosificaciones cuando sean requeridas. (Mínimo diario, si es requerido más se adapta, verificar el máximo)
La máquina es práctica.	La máquina opera de manera rápida.
	La máquina opera automáticamente sin intervención del usuario.
	La máquina es fácil de limpiar.
	La máquina opera de forma normal para el rango de temperatura del establecimiento.
	El sistema opera adecuadamente para condiciones de humedad altas.
	La máquina se puede mover de lugar con facilidad.
	La máquina es pequeña.
	La máquina funciona con un voltaje de tomacorrientes estándar.
La máquina es amigable con el usuario.	La máquina tiene un HMI visual.
	La máquina se conecta con el ecosistema de home del establecimiento.
	La máquina guarda los datos de manera digital. (.csv)
	La máquina da una notificación para informar sobre datos atípicos.
	El sistema muestra los datos medidos y sus graficas
La producción y mantenimiento de la maquina es apropiado.	La máquina es económica de producir.
	La máquina tiene un bajo impacto ambiental.
	La máquina es replicada fácilmente.
	La máquina se repara con repuestos de fácil obtención.
	El sistema es escalable a futuro.

#### 4.1.4 Asignar importancia relativa

Todas las necesidades son atributos deseados, pero se comprobó que tan importantes son relativas la una a la otra. Esto se realizó mediante una segunda encuesta al cliente en la que cada necesidad fue evaluada con respecto a una escala del 1 al 5, desarrollada de la siguiente forma:

1. La función es indeseable en el producto.
2. La función no es importante, pero no es indeseable.
3. La función podría ser beneficiosa, pero no es indispensable.
4. La función es altamente beneficiosa, pero no indispensable.
5. La función es de importancia crítica. Un producto sin esta función se consideraría.

Además de esto se incluyó un espacio de comentario en caso de que al cliente le pareciera única, interesante o inesperada una necesidad en específico. También un espacio de comentarios generales. En la tabla 4.1.3 se observan los resultados de la encuesta que permitió generarla importancia relativa de cada una de las necesidades.

**Tabla 4.1.3.** Lista de Necesidades con su importancia relativa [Elaboración Propia]

Necesidad	Importancia
1	5
2	5
3	5
4	5
5	4
6	3
7	4
8	5
9	5
10	5
11	4
12	5

13	5
14	5
15	5
16	5
17	4
18	5
19	4
20	3
21	4
22	4
23	5
24	5
25	3
26	5
27	5
28	5

#### **4.1.5 Análisis de resultados y el proceso**

Durante el desarrollo de la fase 1 no se presentaron inconvenientes a la hora de realizar el procedimiento y la comunicación con el cliente fue asertiva y concisa. Cabe destacar la facilidad de comunicación que hubo con el cliente debido a la capacidad de hablar con conceptos más técnicos. Se plantearon 28 necesidades, las cuales fueron agrupadas en las 5 necesidades primarias más importantes.

## **4.2 Especificaciones del Producto**

Luego de terminar la determinación de necesidades con éxito, se procedió a definir las especificaciones del producto, o la fase 2. Una especificación es el método que se utiliza para convertir una necesidad en algo que se pueda medir de manera cuantificable. [47] Es importante decir que las especificaciones no dictan como se hace algo, si no miden si se cumplen los objetivos.

La especificación se compone de dos partes, la métrica y el valor objetivo. La métrica es el atributo cuantificable del producto, y el valor objetivo es el valor, o el rango de valores de la métrica para los cuales se cumple el objetivo de la necesidad. Los pasos seguidos fueron elaborar la lista de métricas, recolectar información al respecto, establecer los valores objetivo y valores marginales, y finalmente reflexionar sobre el proceso.

#### 4.2.1 Elaborar lista de métricas

Idealmente cada necesidad debe disponer de al menos una especificación y viceversa, sin embargo, esto no se logró siempre debido a que ¿?. Para definir las métricas se procuró que estas fueran variables dependientes y variables prácticas. También se buscó que no fueran valores binarios, pero no se consiguió esto para todas las métricas. A continuación, en la tabla 4.2.1, se puede observar la lista de métricas definidas para el proyecto.

**Tabla 4.2.1.** Lista de métricas para las necesidades obtenidas [Elaboración Propia]

Numero de métrica	Necesidad	Métrica
1	1	Rango de Medición para pH
2	2	Rango de Medición para EC
3	3	Tasa de muestreo para mediciones
4	4	Exactitud de los sensores
5	5	Rango de Medición de Temperatura
6	6	Cantidad de condiciones atmosféricas
7	7	Rango de medición del nivel del agua del tanque
8	8	Exactitud de dosificación de pH
9	9	Exactitud de dosificación de EC
10	10	Tasa de dosificación
11	11	Tiempo de ciclo de trabajo
12	12	Confiablez del sistema

13	13	Número de piezas desmontables para limpiar
14	14	Rango de temperatura de operabilidad
15	15	Rango de humedad de operabilidad
16	16	Peso de la maquina
17	17	Volumen de la maquina
18	19	Tasa de aceptación del usuario
19	21	Formato de los datos almacenados
20	22	Formato de la notificación
21	23	Cantidad de datos medidos y de graficas disponibles
22	24	Precio
23	25	Huella de carbono
24	26	Tiempo necesario para replicar
25	27	Disponibilidad de repuestos
26	28	Escalabilidad horizontal

#### 4.2.2 Establecer los valores objetivo

Seguidamente, luego de obtener las métricas, se deben establecer los valores objetivo. Se dividen en 2 los cuales corresponden a valores meta o ideales y valores marginales. Para plantear los valores meta y marginales se utilizaron tres acercamientos. Algunos de los valores fueron dados por el cliente, en alguna de las dos entrevistas, lo cual nos da los valores directamente. También se utilizó el criterio ingenieril a partir del conocimiento interno que se tenía en distintos campos de conocimiento, como los son los conceptos relacionados con la dosificación, y la parte de UX/UI y las interacciones con el usuario, para así poder escoger estos valores objetivo. Finalmente, para los casos en donde no se disponía de buen criterio para elegir valores, se procedió a realizar una búsqueda externa de información para así poder escoger con una mejor idea. Cabe destacar que se procura que los valores objetivo sean intervalos o rangos, no valores exactos. A continuación, en la tabla 4.2.2 se evidencia la lista de métricas con los valores objetivo-escogidos.

**Tabla 4.2.2.** Lista de métricas con sus valores objetivo [Elaboración Propia]

Núm. métrica	Necesidad	Métrica	imp	unidades	Valor marginal	Valor ideal
1	1	Rango de Medición para pH	5	ul	3-10	0-14
2	2	Rango de Medición para EC	5	mS/cm	0.5-2	0.2-5
3	3	Tasa de muestreo para mediciones	5	min	<15	<5
4	4	Exactitud de los sensores	5	%	<10	<5
5	5	Rango de Medición de Temperatura	4	°C	15-35	10-40
6	6	Cantidad de condiciones atmosféricas	3	ul	>3	>5
7	7	Rango de medición del nivel del agua del tanque	4	l	30-70	10-90
8	8	Exactitud de dosificación de pH	5	%	<20	<10
9	9	Exactitud de dosificación de EC	5	%	<20	<10
10	10	Tasa de dosificación	5	min	<15	<5
11	11	Tiempo de ciclo de trabajo	4	min	<30	<10
12	12	Confiabledad	5	%	>90	>95
13	13	Número de piezas desmontables para limpiar	5	ul	<8	<5

14	14	Rango de temperatura de operabilidad	5	°C	15-35	10-40
15	15	Rango de humedad de operabilidad	5	%	50-80	30-90
16	16	Peso de la maquina	5	kg	<10	<5
17	17	Volumen de la maquina	4	m <sup>3</sup>	<1	<0.5
18	19	Tasa de aceptación del usuario	4	%	>70	>95
19	21	Formato de los datos almacenados	4	Lista	csv	Csv, xlsx
20	22	Formato de la notificación	4	Lista	Correo	Correo, sms, sonido
21	23	Cantidad de datos medidos y de graficas disponibles	5	Lista	pH, EC	pH, EC, Dosificaciones, Grafica de pH, Grafica de EC
22	24	Precio	5	\$	<800	<500
23	25	Huella de carbono	3	kg CO <sub>2</sub> eq	<50	<20
24	26	Tiempo necesario para replicar	5	Días	<2	<1
25	27	Disponibilidad de repuestos	5	%	>80	>90
26	28	Escalabilidad horizontal	5	ul	>4	>10

### 4.2.3 Análisis sobre el proceso

Durante el desarrollo del proyecto fue posible completar correctamente la fase 2 de la metodología debido a que se llegó a una lista de métricas con sus valores objetivo definidos. Es importante mencionar el aspecto de que algunas de las necesidades eran de carácter binario. Correspondían a características fáciles de incluir en el diseño final, ya que no es adecuado realizar métricas para este tipo de necesidades.

## 4.3 Conceptualización del proceso de diseño

En esta fase 3 de la metodología se buscó organizar el diseño de la solución como tal. Aquí se planteó una forma de obtener conceptos para solucionar distintas partes del problema. Mas específicamente se tiene una forma de explorar las distintas posibilidades que podrían convertirse en soluciones. [47]

Para esta fase se desarrollan los pasos de división en subproblemas en la cual el problema se divide en subpartes. Luego de esto está la búsqueda de conceptos, que plantea realizar una exploración interna y externa para plantear posibles conceptos. Después se tiene la exploración sistemática en donde se organizan y combinan conceptos. Y finalmente, se plantea el análisis del proceso.

### 4.3.1 División en subproblemas

Según la metodología planteada, el siguiente paso corresponde a la división del problema en subproblemas que son más entendibles de manera técnica y más manejables. Con esto se pudo pensar en estrategias de solución para cada uno de estos subproblemas. La descomposición funcional definió los subproblemas como funciones. Se tiene un marco inicial, el cual se puede apreciar en la figura 4.3.1 para definir las entradas y salidas importantes del sistema.

## Entradas

## Salidas

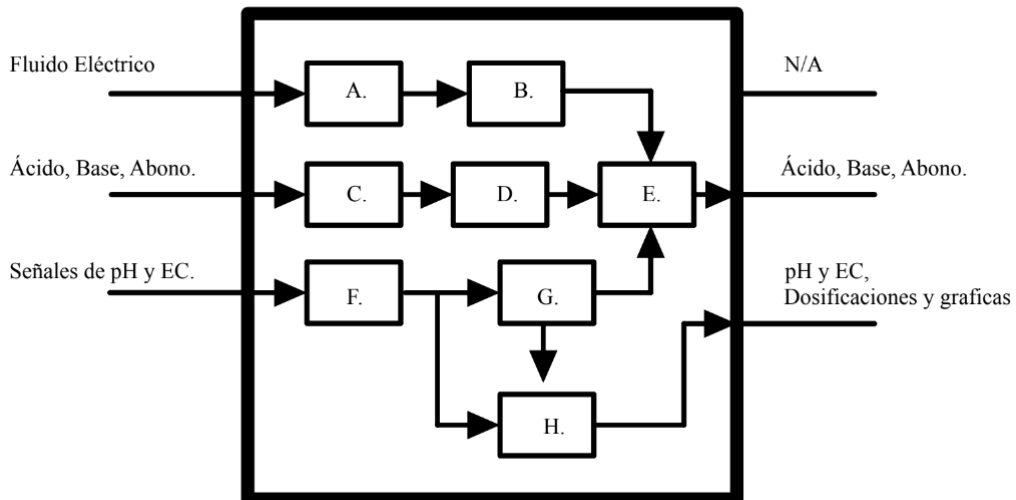


**Figura 4.3.1.** Marco inicial para descomposición funcional del problema [Elaboración Propia].

El proceso de división continua iterativamente, hasta que se tuvieron subproblemas que puedan ser tomados en consideración de manera separada o individual. A continuación, en la figura 4.3.2 se puede ver la descomposición funcional completa del sistema en cuestión.

## Entradas

## Salidas



**Figura 4.3.2.** Descomposición funcional del Sistema [Elaboración Propia].

## Lista de Subsistemas

- A. Recibir energía externa
- B. Convertir energía en cinética
- C. Recibir y almacenar líquidos reserva
- D. Transportar líquidos
- E. Dosificar
- F. Detectar niveles de pH y EC
- G. Procesar señales y generar señal de control
- H. Interconexión y Escalabilidad

### **4.3.2 Búsqueda de conceptos**

El objetivo para esta siguiente parte de la conceptualización del proceso corresponde a la búsqueda para generar una lista exhaustiva y completa de conceptos. No se realiza ningún tipo de selección o filtrado, ya que esto se hace en la siguiente parte de la metodología. Se realiza por subsistemas, realizando búsqueda Interna y externa para cada uno. Se inicia con la búsqueda interna, generando la mayor cantidad de posibles conceptos. Esto es de suma utilidad en este caso debido a la naturaleza mecatrónica del problema y a los conocimientos técnicos que ya se tenían en estas áreas de conocimiento. Se procede con técnicas como la lluvia de ideas. Luego de esto se prosiguió a la búsqueda externa en donde se consultaron principalmente literatura sobre el tema, patentes, y la información obtenida por profesionales de la empresa. Cabe destacar que para algunos de los subsistemas se planteó una búsqueda externa en forma de escaneo de conceptos debido a la simplicidad de los mismos. Por otro lado, hubo otros subsistemas que si requirieron una búsqueda externa más exhaustiva. A continuación, se muestran los resultados de la búsqueda de información externa e interna para cada subsistema.

**Tabla 4.3.1.** Conceptos para sistema Recibir Energía Externa [Elaboración Propia]

Búsqueda Interna	Búsqueda Externa
Lluvia de ideas	Búsqueda de artículos y patentes
Enchufe 120V	Energía cinética
Enchufe 240V	Energía térmica
Panel solar	Energía inductiva (Wireless)
Aero-energía	
Hidro-energía	
Energía nuclear	
Baterías	

**Tabla 4.3.2.** Conceptos para sistema Convertir Energía a Forma Cinética [Elaboración Propia]

Búsqueda Interna	Búsqueda Externa
Lluvia de ideas	Búsqueda de artículos y patentes
Motores eléctricos	Motores térmicos
Bombas	Motores paso a paso
Motores de combustión interna	Motores DC
Sistemas mecánicos	Motores AC

**Tabla 4.3.3.** Conceptos para sistema Recibir y Almacenar Líquidos Reserva [Elaboración Propia]

Búsqueda Interna	Búsqueda Externa
Lluvia de ideas	Búsqueda de artículos y patentes
Tanques de reserva	Tanques presurizados
Tanques de polietileno	Tanques de acero inoxidable
	Tanques de vidrio

**Tabla 4.3.4.** Conceptos para sistema Transportar Líquidos [Elaboración Propia].

Búsqueda Interna	Búsqueda Externa
Lluvia de ideas	Búsqueda de artículos y patentes
Sistema de tuberías Dosis encapsuladas	Tubería de acero Tubería de polietileno Tubería de silicona Tubería de PVC

**Tabla 4.3.5.** Conceptos para sistema Dosificar [Elaboración Propia]

Búsqueda Interna	Búsqueda Externa
Lluvia de ideas	Búsqueda de artículos y patentes
Válvula de paso Bomba	Bomba peristáltica Bomba centrifuga Bomba de tornillo Bomba hidráulica

**Tabla 4.3.6.** Conceptos para sistema Detectar Niveles de pH y EC [Elaboración Propia]

Búsqueda Interna	Búsqueda Externa
Lluvia de ideas	Búsqueda de artículos y patentes
Sensores digitales Sensores analógicos	Tiras de pH y EC Soluciones indicadoras de pH y EC Medidores de mano

**Tabla 4.3.7.** Conceptos para sistema Procesar Señales y Generar Señal de Control [Elaboración Propia]

Búsqueda Interna	Búsqueda Externa
Lluvia de ideas	Búsqueda de artículos y patentes
Arduino	Esp32
Raspberry Pi	Procesadores de Señales Digitales (DSP)
PLC	Sensores y Actuadores inteligentes
Esp8266	FPGA

**Tabla 4.3.8.** Conceptos para sistema Interconexión y Escalabilidad [Elaboración Propia]

Búsqueda Interna	Búsqueda Externa
Lluvia de ideas	Búsqueda de artículos y patentes
Bluetooth	Red LAN
Manual	Apple home
	Alexa
	Homeassistant con MQTT

### 4.3.3 Organización y combinación de conceptos

Esta corresponde a la tercera etapa de la fase 3. A continuación se describe más a detalle el proceso tanto para la parte de organización, como para la parte de combinación de conceptos.

En esta sección se presentan los conceptos más prominentes para cada subproblema, para así plantear candidatos a solución. Como la combinación total de los conceptos es algo no viable de manera práctica, se procede a combinar intentando cubrir el mayor rango de posibles combinaciones y generando diversidad en la naturaleza de las soluciones. Para esto se toma en cuenta el criterio ingenieril, aparte de la información obtenida en las fuentes externas referenciadas al final del documento.

A continuación, en las tablas 4.3.9 y 4.3.10 se presentan una serie de combinaciones para dos sistemas planteados. Estos corresponden al sistema de traslación de líquidos, y al sistema de medición y control. Esta división se realizó para poder comparar conceptos y evaluar su desempeño una vez que se combinan con otros subsistemas con los que tienen interrelación.

**Tabla 4.3.9.** Combinación de conceptos para sistema de traslación de líquidos [Elaboración Propia]

Combinación de Conceptos				
Solución	Recibir Energía Externa	Convertir Energía a Forma Cinética	Transportar Líquidos	Dosificar
A	Enchufe 120V	Motor DC	Tubería de Acero	Bomba centrífuga
B	Enchufe 120V	Motor AC	Tubería de silicona	Válvula de paso
C	Baterías	Motor Paso a Paso	Tubería de PVC	Bomba Peristáltica
D	Enchufe 240V	Motor AC	Tubería de Polietileno	Bomba Hidráulica
E	Enchufe 120V	Motor DC	Tubería de silicona	Bomba Peristáltica
F	Baterías	Motor AC	Tubería de PVC	Bomba centrífuga
G	Enchufe 120V	Motor Paso a Paso	Tubería de silicona	Bomba de Tornillo

**Tabla 4.3.10.** Combinación de conceptos para sistema de medición y control [Elaboración Propia].

Combinación de Conceptos			
Solución	Procesar Señales y Generar Señal de Control	Detectar Niveles de pH y EC	Interconexión y Escalabilidad
A	Raspberry Pi	Tiras de pH y EC	Bluetooth
B	FPGA	Medidores de Mano	Homeassistant con MQTT
C	Esp8266	Sensores Analógicos	Apple home
D	Sensores y Actuadores inteligentes	Soluciones indicadoras de pH y EC	Manual
E	PLC	Sensores Digitales	Red LAN
F	Esp32	Medidores de mano	Bluetooth
G	Esp8266	Sensores Digitales	Homeassistant con MQTT

Se plantearon estos dos sistemas para los subproblemas que estaban directamente relacionados. Ahora, con respecto al subsistema de Recibir y Almacenar líquidos de reserva este se tomó como un sistema independiente ya que su configuración no tiene impacto sobre los demás subsistemas.

#### 4.3.4 Análisis del proceso

Como reflexión a lo desarrollado en la fase 3 se tiene que se cumplieron los pasos de manera correcta debido a que se llegó a las tablas de combinación de conceptos siguiendo los pasos de la metodología. Se planteó aislar los subproblemas independientes en sistemas, lo cual ayudó a enfocar la sección de selección y evaluación de conceptos a las

combinaciones de los subproblemas que están relacionados entre sí, como lo son los mostrados en las tablas 4.3.9 y 4.3.10.

## 4.4 Selección y Evaluación de Conceptos

Para la siguiente fase del proyecto ya se tienen previamente una lista con un número importante de conceptos que son candidatos a la solución final. Ahora bien, es muy importante seleccionar la combinación de conceptos correcta. Básicamente es el proceso de evaluar los conceptos planteados tomando en cuenta las necesidades del cliente y otros criterios adicionales, para así seleccionar los más adecuados. [47] Existen dos secciones importantes en esta fase 4, la sección de filtrado, y la sección de selección. La fase de filtrado es más genérica y aquí se buscó eliminar los conceptos que claramente no son viables. También determinar el desempeño de cada concepto con respecto a las necesidades del cliente, y combinar o modificar conceptos para obtener mejores variantes. En la segunda sección de selección se seleccionó el concepto ganador que idealmente cumple con todas las especificaciones de manera óptima. Finalmente se reflexionó sobre lo llevado a cabo y se documentó lo mismo.

### 4.4.1 Filtrado

Las tablas de filtrado para ambos subsistemas planteados en la fase anterior se presentan a continuación en las tablas 4.4.1 y 4.4.2. Cabe destacar que en la tabla 4.4.1 la solución B es la referencia y en la tabla 4.4.2 la solución C es la referencia.

**Tabla 4.4.1.** Matriz de filtrado para el sistema de traslación de líquidos [Elaboración Propia]

Conceptos Manipulación Objeto							
Criterios de Selección	A	B referencia	C	D	E	F	G

Incertidumbre de dosificación de pH	-	0	+	0	+	-	0
Incertidumbre de dosificación de EC	-	0	+	0	+	-	0
Número de piezas desmontables para limpiar	-	0	-	0	0	-	-
Rango de temperatura de operabilidad	0	0	0	0	0	0	0
Rango de humedad de operabilidad	0	0	0	0	0	0	0
Precio de la máquina	-	0	-	0	0	0	-
Costo de repuestos	-	0	-	0	0	0	-
Tiempo necesario para replicar	-	0	0	0	0	0	-
Disponibilidad de repuestos	-	0	0	0	0	0	-
Peso	-	0	-	0	0	0	-
Dimensiones de la máquina	-	0	-	-	+	-	-
Suma +	0	0	2	0	3	0	0
Suma 0	2	11	4	10	8	7	4
Suma -	9	0	5	1	0	4	7
Evaluación neta	-7	0	-3	-1	3	-4	-7
Lugar	6	2	4	3	1	5	6
Continuar	No	Si	No	Si	Si	No	No

**Tabla 4.4.2.** Matriz de filtrado para el sistema de medición y control [Elaboración Propia].

Criterios de Selección	A	B	C referencia	D	E	F	G
Rango de Medición para pH y EC	-	+	0	-	+	+	+
Tasa de muestreo para mediciones	-	-	0	-	+	-	+
Incertidumbre de los sensores	-	+	0	-	+	+	+
Rango de Medición de Temperatura	-	+	0	+	+	0	+
Cantidad de condiciones atmosféricas	-	+	0	+	+	0	+
Rango de medición del nivel del agua del tanque	-	0	0	-	0	0	0
Tiempo de ciclo de trabajo	-	-	0	-	+	-	+
Número de piezas desmontables para limpiar	0	0	0	0	-	0	0
Tasa de intervención del usuario	-	-	0	-	0	-	0
Formato de los datos almacenados	0	0	0	-	-	-	+
Formato de la notificación	0	0	0	-	-	0	0

Cantidad de datos medidos y de graficas disponibles	-	0	0	-	0	-	+
Precio	0	-	0	+	-	0	0
Tiempo necesario para replicar	0	0	0	-	-	0	0
Disponibilidad de repuestos	0	-	0	0	0	0	0
Escalabilidad horizontal	0	0	0	-	0	-	+
Suma +	0	4	0	3	6	2	9
Suma 0	7	7	16	2	5	8	7
Suma -	9	5	0	11	5	6	0
Evaluación neta	-9	-1	0	-8	1	-4	9
Lugar	7	4	3	6	2	5	1
Continuar	No	No	Si	No	Si	No	Si

Con respecto a las matrices de filtrado mostradas anteriormente se tiene que se tomaron 3 conceptos para cada tabla que pasan a la siguiente fase de selección. No se consideró necesario combinar conceptos debido a la diferencia en evaluación neta que tenían estos mismos. Estos 3 conceptos ganadores por cada subsistema pasan a la siguiente fase de selección en la cual se elige un concepto ganador.

## 4.4.2 Selección

Se procedió a clasificar las combinaciones de conceptos con los criterios anteriores, pero de una manera más precisa o cuantificable, dando, así como resultado un sistema de posiciones y una combinación ganadora. Los conceptos que se utilizan en esta fase son los que pasaron la etapa anterior de filtrado. La mayor diferencia entre el filtrado y la selección es que se pondera un resultado para cada criterio, dando lugar a una calificación cuantificable. La puntuación ahora se da en una escala del 1 al 5, siendo el 3 la referencia, el 1 notablemente peor que la referencia, y el 5 notablemente superior a la referencia. A continuación, en las tablas 4.4.3 y 4.4.4 se aprecian las matrices de selección para ambos sistemas planteados. Cabe destacar que para la tabla 4.4.3 la referencia es la solución B, y para la tabla 4.4.4 lo es la C.

**Tabla 4.4.3.** Matriz de Selección para el sistema de traslación de líquidos [Elaboración Propia]

Criterios de Selección	Peso %	Conceptos					
			B		D		E
		Cal	Cal Pond	Cal	Cal Pond	Cal	Cal Pond
Incertidumbre de dosificación de pH	15	3	0.45	3	0.45	4	0.6
Incertidumbre de dosificación de EC	15	3	0.45	3	0.45	4	0.6
Número de piezas desmontables para limpiar	10	3	0.3	3	0.3	4	0.4
Rango de temperatura de operabilidad	5	3	0.15	3	0.15	3	0.15

Rango de humedad de operabilidad	5	3	0.15	3	0.15	3	0.15
Precio de la máquina	10	3	0.3	2	0.2	4	0.4
Costo de repuestos	5	3	0.15	2	0.1	3	0.15
Tiempo necesario para replicar	10	3	0.3	3	0.3	3	0.3
Disponibilidad de repuestos	10	3	0.3	3	0.3	3	0.3
Peso	5	3	0.15	2	0.1	3	0.15
Dimensiones de la máquina	10	3	0.3	2	0.2	3	0.3
	100						
Evaluación neta			3		2.7		3.5
Lugar			2		3		1

**Tabla 4.4.4.** Matriz de Selección para el sistema de medición y control [Elaboración Propia]

Criterios de Selección	Peso %		C		E		G
		Cal	Cal Pond	Cal	Cal Pond	Cal	Cal Pond
Rango de Medición para pH y EC	15	3	0.45	3	0.45	3	0.45
Tasa de muestreo para mediciones	5	3	0.15	3	0.15	3	0.15
Incertidumbre de los sensores	10	3	0.3	4	0.4	4	0.4
Rango de Medición de Temperatura	2	3	0.06	1	0.02	3	0.06

Cantidad de condiciones atmosféricas	2	3	0.06	1	0.02	3	0.06
Rango de medición del nivel del agua del tanque	2	3	0.06	3	0.06	3	0.06
Tiempo de ciclo de trabajo	10	3	0.3	4	0.4	4	0.4
Número de piezas desmontables para limpiar	5	3	0.15	1	0.05	4	0.2
Tasa de intervención del usuario	10	3	0.3	3	0.3	3	0.3
Formato de los datos almacenados	5	3	0.15	3	0.15	4	0.2
Formato de la notificación	4	3	0.12	3	0.12	4	0.16
Cantidad de datos medidos y de graficas disponibles	10	3	0.3	3	0.3	3	0.3
Precio	5	3	0.15	1	0.05	3	0.15
Tiempo necesario para replicar	5	3	0.15	2	0.1	3	0.15
Disponibilidad de repuestos	5	3	0.15	2	0.1	3	0.15
Escalabilidad horizontal	5	3	0.15	4	0.2	4	0.2
	100						
Evaluación neta			3		2.87		3.39
Lugar			2		3		1

Como se mencionó previamente, existe un subsistema que puede ser considerado como independiente. Para este caso, lo que se desarrollo fue un análisis simple del concepto tomando en consideración las métricas y necesidades planteadas. A partir de esto, se tienen los resultados que se pueden observar en la tabla 4.4.5.

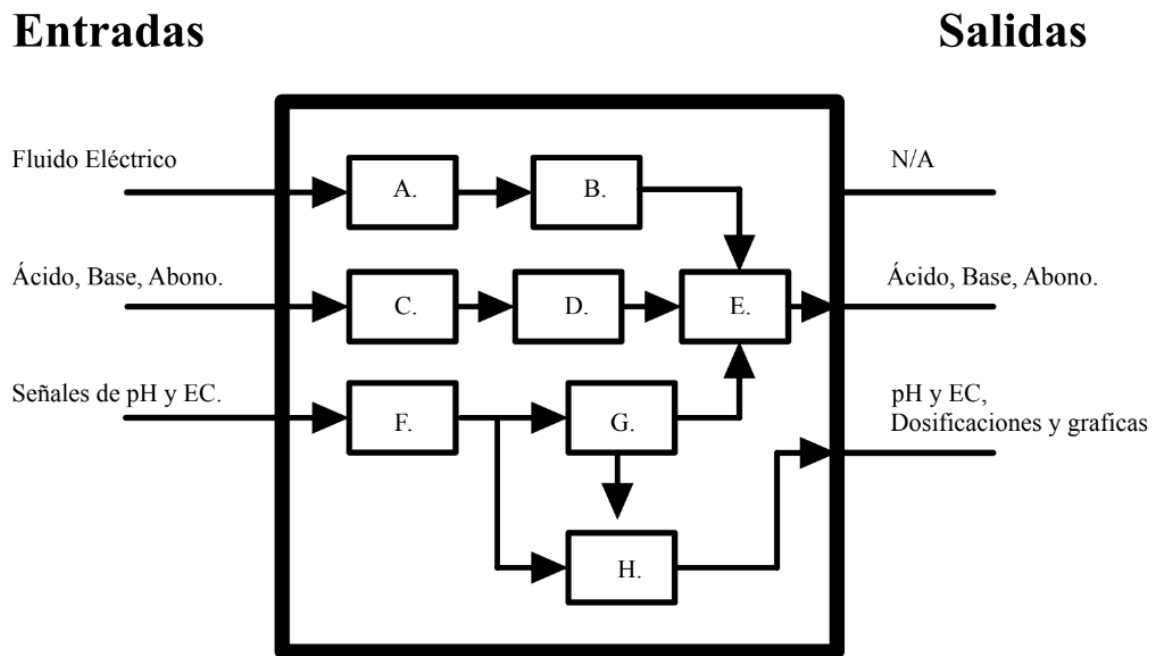
**Tabla 4.4.5.** Conceptos ganadores para subsistemas independientes [Elaboración Propia]

Subsistema	Concepto Ganador
Recibir y almacenar líquidos reserva	Tanques de polietileno

### 4.4.3 Concepto Ganador

#### 4.4.3.1 Diagrama de combinación de conceptos ganadores

A continuación, en la siguiente figura 4.3.2 se aprecia la solución planteada con la combinación de conceptos ganadores interpolados en la descomposición funcional que se realizó previamente.



**Figura 4.3.2.** Descomposición funcional del Sistema con Conceptos Ganadores [Elaboración Propia]

- A. Recibir energía externa - Enchufe 120V
- B. Convertir energía en cinética – Motor DC
- C. Recibir y almacenar líquidos reserva - Tanques de polietileno
- D. Transportar líquidos – Tubería de Silicona
- E. Dosificar – Bomba Peristáltica
- F. Detectar niveles de pH y EC – Sensor Digital y Sensor Analógico
- G. Procesar señales y generar señal de control – Esp8266
- H. Interconexión y Escalabilidad – Homeassistant con MQTT

#### ***4.4.3.2 Sistema traslación de líquidos***

Primero se tiene el sistema de recepción de energía externa, para el cual el concepto elegido fue un enchufe de 120V. Esto corresponde a un enchufe de tipo A que es estándar en el país, de manera que el componente que se eligió fue una fuente de poder conmutativa que tenga como salida un voltaje DC utilizable por el resto del sistema. Para el caso específico del proyecto se eligió una salida de 12V ya que este es el voltaje de las bombas peristálticas.

Cabe destacar que la potencia de la fuente de poder debe ser suficiente para poder suministrarle energía a todo el sistema, para confirmar esto se revisaron las especificaciones técnicas de cada componente elegido, y se sumó la potencia de consumo de todos estos. Cada bomba tiene un consumo máximo de potencia de 5W, y la combinación de los otros componentes del sistema como el microcontrolador, los sensores, y el Buck converter tienen un consumo de potencia menor a 1W. De esta manera haciendo una sumatoria de la potencia requerida por el sistema se tienen 16W. Este es un número al cual nunca se llegaría de manera práctica debido a que no es posible que se activen las 3 bombas al mismo tiempo, pero es un cálculo útil para dimensionar una fuente de poder que sea capaz de proveer al sistema la potencia que se requiere. Se eligió una fuente conmutada de 12V que suministra 24W de potencia. Esta selección se hizo ya que era el siguiente valor comercial arriba de 16W, y además esto genera un margen de seguridad adicional al sistema.

Se hablará del subsistema de convertir energía a forma cinética, y el subsistema de dosificar de manera conjunta debido a que en el mercado se encontró el producto con la combinación ya realizada. Se tiene que la forma de conversión de energía fue de motor DC,

debido a que no se requería un motor muy complejo para la solución. El motor DC fue la combinación ideal entre costo, peso y dimensiones, y utilidad que se requería.

Por otro lado, la bomba peristáltica fue una elección sumamente buena para la naturaleza del proyecto en el subsistema de dosificación. Como el fluido no entra en contacto directo con partes móviles de la bomba esto alarga la vida útil de la misma y previene fuentes de contaminación, considerando la naturaleza alimentaria del producto. Además de esto, se tiene una muy buena precisión en el caudal, lo cual quiere decir que se pueden controlar de manera muy exacta las dosificaciones, algo buscado para este proyecto. Los criterios de selección principales para la bomba peristáltica fueron potencia del motor, flujo de la bomba, precio, peso, y dimensiones.

El último subsistema para la parte de traslación de líquidos corresponde a las tuberías de silicona. Las tuberías de silicona eran la mejor opción considerando su precio, practicidad, y capacidad de transportar los líquidos en cuestión. Este es un componente que no tiene mucho detalle aparte de esto, simplemente se necesitaba una tubería que fuera compatible con las bombas elegidas, y que cumpliera con las características anteriores. Lo primero quiere decir que tuvieran un diámetro interno acoplable con las salidas de la bomba peristáltica. El diámetro interno utilizado fue de 3 mm.

#### ***4.4.3.3 Sistema de medición y control***

Con respecto a este sistema de medición y control se empieza hablando de la elección del concepto ganador de Procesar Señales y Generar Señal de Control. Aquí se eligió el Esp8266 debido a que fue una de las mejores opciones, en conjunto con el Esp32, adicionalmente el cliente ya disponía de un par de unidades en el establecimiento que había obtenido para un proyecto anterior, y se deseaba utilizarlas de ser posible en este proyecto. El esp8266 es ideal debido a su costo, peso, dimensiones, capacidades de conectividad, facilidad de uso, y documentación disponible.

Los sensores digitales no tenían mucha competencia en comparación con los demás conceptos. Estos eran los mejores debido a su precisión y fiabilidad, y menor susceptibilidad al ruido. Cabe destacar que con los sensores ya se disponían sensores analógicos de pH, de

manera que se utilizaron para la solución final a solicitud del cliente. No eran la mejor opción, pero de los conceptos planteados se considera que es la segunda mejor opción. Los sensores de EC si fueron comprados, de manera que su selección si fue la ideal según la metodología planteada.

Por último, con respecto al subsistema de interconexión y escalabilidad se dispone de Raspberry pi con Homeassistant. Los principales factores para esta elección fueron los de conectividad, facilidad de uso, documentación, flexibilidad, accesibilidad remota, y la capacidad de mandar notificaciones.

#### **4.4.4 Análisis**

A partir de lo desarrollado en esta fase 4 de selección y evaluación de conceptos, se obtuvieron las combinaciones ganadoras para cada subsistema planteado, de manera que se desarrolló correctamente esta fase y se puede seguir al siguiente paso, correspondiente a la evaluación y prueba de conceptos. En el presente documento se presenta primero el desarrollo de la solución como tal, y luego se describirá la parte de validación del sistema, en conjunto con los resultados.

Por último, como algunos de los subsistemas eran independientes al resto de la solución, se planteó escoger el mejor concepto para cada subproblema. Cabe destacar que para realizar esto de manera correcta se debe de utilizar el criterio ingenieril y realizar búsqueda de información externa.

## *Capítulo 5. Diseño de la Solución*

En este capítulo se dedica a básicamente explicar de manera específica los detalles de la solución desarrollada. mediante la descripción del hardware empleado, el software elegido, y se considera también de la parte programación y de la lógica de control del sistema, así como de aspectos adicionales generales.

### 5.1 Descripción del hardware

Para describir el hardware seleccionado y empleado se toman como referencia los dos sistemas de subproblemas en la sección de selección del concepto ganador, y una serie de componentes adicionales necesarios para integrar las partes. Adicional a esta información, en el Apéndice 9.2 se muestra el plano eléctrico del sistema.

#### **5.1.1 Sistema traslación de líquidos**

A continuación, se presenta la tabla 5.1.1.1. que muestra el hardware empleado para el sistema de traslación de líquidos.

**Tabla 5.1.1.** Hardware empleado para el sistema de traslación de líquidos [Elaboración Propia].

Componente	Sistema	Obtención	Comentario
Fuente conmutada	Recibir energía externa	<a href="https://www.crcibernetica.com/12v-2a-power-supply-adapter/">https://www.crcibernetica.com/12v-2a-power-supply-adapter/</a>	Voltaje de salida 12V, Potencia 24W
Tubería de Silicona	Transportar Líquidos	De manera local en acuarios	Diámetro interno de 3mm
Bomba Peristáltica	Convertir energía en cinética / Dosificar	<a href="#">NKP-DC-S10B</a>	Diámetro interno de 3mm, Potencia 5W, Flujo $\geq 70$ ml/min

Los componentes seleccionados provienen del proceso de razonamiento complementado por criterios técnicos explicados en el capítulo 4. A partir de esto se realizó una búsqueda principalmente en suplidores locales, de donde se pretendió obtener la mayor cantidad de componentes. Seguido de esto, en situaciones en donde no existía un suministro local del componente, se procedió a buscar externamente en sitios web principalmente. Cabe destacar que el cliente solicitó que los componentes fueran de fácil obtención como se mencionó previamente, de manera que sitios de compra como Amazon, o los sitios web de las mismas empresas que manufacturan los componentes fueron considerados.

Con respecto a la fuente conmutada, se seleccionó una que tuviera 12V, y un mínimo de 16W de salida. La opción elegida fue de 24W obtenida de manera local en CrCibernetica. Las tuberías de silicona para transportar los líquidos se encontraron en la búsqueda que son de fácil acceso en acuarios locales, de manera que se procedió a ir en persona a comprar el producto. Las características importantes de la tubería fueron que fueran de silicona, y que tuvieran un diámetro interno de 3mm para poder acoplarse con las bombas. Posterior a esto, se eligió la bomba peristáltica modelo NKP-DC-S10B. Este dispone de un motor DC de potencia máxima de 5W, posee la manguera de silicona de 3mm de diámetro interno, y además permite el reemplazo de los cabezales peristálticos en caso de que esta parte del

componente falle, pero el motor DC este en buen estado. Posee un flujo de 90 ml/min lo cual es ideal según las dosificaciones variables que hace la empresa actualmente de 5 a 40 ml.

### 5.1.2 Sistema de medición y control

A continuación, se presenta la tabla 5.1.1.2. que muestra el hardware empleado para el sistema de medición y control.

**Tabla 5.1.1.2.** Hardware empleado para el sistema de medición y control [Elaboración Propia].

Componente	Sistema	Obtención	Comentario
Sensor Digital	Detectar niveles de EC	<a href="https://atlas-scientific.com/kits/mini-conductivity-k-1-0-kit/">https://atlas-scientific.com/kits/mini-conductivity-k-1-0-kit/</a>	Método de comunicación UART
Sensor Analógico	Detectar niveles de pH	<a href="https://atlas-scientific.com/kits/surveyor-analog-ph-kit/">https://atlas-scientific.com/kits/surveyor-analog-ph-kit/</a>	Analógico
ESP8266	Procesar señales y generar señal de control	<a href="https://www.crcibernetica.com/nodemcu-v3-lua-lolin-esp8266-dev-board/">https://www.crcibernetica.com/nodemcu-v3-lua-lolin-esp8266-dev-board/</a>	Node MCU V3
Homeassistant con MQTT	Interconexión y Escalabilidad	<a href="https://www.crcibernetica.com/raspberry-pi-4-model-b-4-gb/">https://www.crcibernetica.com/raspberry-pi-4-model-b-4-gb/</a>	Raspberry pi 4, Homeassistant OS

Para este subsistema de igual manera los componentes seleccionados provienen del razonamiento y criterios técnicos explicados en el capítulo 4. Se busco inicialmente en suplidores locales y en el caso que no tuvieran disponibilidad se procedió a realizar una búsqueda externa en páginas descritas anteriormente.

Con respecto a los sensores se obtuvieron directamente con la empresa de Atlas Scientific. Cabe destacar que los sensores de pH analógicos fueron obtenidos por parte de la empresa anteriormente, de manera que no se compraron en el transcurso del proyecto. Si este fuera el caso se hubieran comprado los sensores digitales directamente. Estos sensores analógicos ofrecen un rango de medición de 2 a 13 de pH, lo cual es apropiado para la

aplicación. También tienen una precisión y resolución de 0.1 pH, lo cual cumple con las métricas de precisión planteadas. El tiempo de respuesta del sensor es de 4 s. El sensor digital de EC fue obtenido por la misma página web de Atlas Scientific. Este sensor ofrece un rango de medición de 0.005 a 200 mS/cm, que se encuentra dentro del rango aplicable a la naturaleza del sistema. La precisión e incertidumbre son de 0.01 mS, y se ofrece un tiempo de respuesta de 1 s.

Seguidamente, el Esp8266 fue obtenido por medio de la empresa costarricense CrCibernetica. El Esphome Node MCU V3 es una versión actualizada de la placa de desarrollo que cumple con todas las condiciones de conectividad y tipos de entradas y salidas planteadas en el capítulo 4. Finalmente, el homeassistant con MQTT fue implementado por medio de una raspberry pi que se encontraba ya en la empresa debido a un proyecto previo de monitoreo en cultivo de hongos que fue abandonado. La Raspberry Pi 4 es un componente de hardware usado ampliamente para el uso de Homeassistant OS, que se explicara en la sección de software. Este dispositivo cumple con los requerimientos de conectividad, procesamiento, y memoria del software elegido. A parte de esto es una computadora muy compacta que facilita reducir las dimensiones del módulo. De igual manera se incluye un link de obtención por medio de CrCibernetica para este componente.

### **5.1.3 Componentes adicionales**

A continuación, se presenta la tabla 5.1.1.3. que muestra el hardware empleado considerando los componentes adicionales del sistema.

**Tabla 5.1.1.3.** Hardware empleado tomando en consideración los componentes adicionales.

[Elaboración Propia]

Componente	Funcionalidad	Obtención	Comentario
Tanques de reserva	Recibir y almacenar líquidos reserva	De manera local en ferreterías	Capacidad 3 l Material Polietileno
Relays	Controlar accionamiento de las bombas	<a href="https://www.crcibernetica.com/4-channel-5v-relay-module/">https://www.crcibernetica.com/4-channel-5v-relay-module/</a>	Mínimo 3 canales (Común 4 canales)
Cables	Conectar el sistema eléctricamente	De manera local en tiendas de electrónica	AWG 24
Buck Converter	Reducir el voltaje del sistema para alimentar el esp8266	<a href="https://www.crcibernetica.com/lm2596-dc-dc-buck-converter-step-down-power-module-output-1-25v-35v/">https://www.crcibernetica.com/lm2596-dc-dc-buck-converter-step-down-power-module-output-1-25v-35v/</a>	Voltaje de salida 1.25V-35V
Caja protectora	Contener el sistema	<a href="https://www.crcibernetica.com/ip67-enclosure-flanged-120/">https://www.crcibernetica.com/ip67-enclosure-flanged-120/</a>	Protección IP67

Al igual que los dos sistemas anteriores, se eligieron los componentes adicionales por medio de los criterios técnicos explicados en el capítulo anterior. Se busco inicialmente en suplidores locales y en el caso que no tuvieran disponibilidad se procedió a realizar una búsqueda externa en páginas web.

Los tanques de reserva se consiguieron de manera local en ferreterías, de manera que su reemplazo es de fácil obtención. Lo importante para esta selección fue que la capacidad fuera suficiente para varios días, que, con las tasas de dosificación de la empresa, esta recomendó tanques de 3 l debido a restricciones de espacio también. Los relays empleados para el control de las bombas peristálticas fueron obtenidos en CrCibernetica. Se requerían de 3 canales para controlar 3 bombas, pero debido a practicidad, espacio y conveniencia, se eligió un módulo de 4 relays en lugar de varios módulos más pequeños. El relay cumple con las características de potencia del sistema, y de igual manera funciona con el voltaje y corriente suministradas por el microcontrolador.

Los cables utilizados fueron de AWG 24 debido a que eran cables disponibles en la empresa, y sus capacidades eléctricas de hasta 5 A están por encima de las corrientes que se presentan en el sistema. El Buck converter fue un dispositivo empleado adicionalmente para poder bajar el voltaje del suministro de potencia, que es 12V, a un voltaje apropiado como entrada para el node MCU. El voltaje configurado manualmente fue de 7V ya que se encuentra en el límite inferior de voltaje de entrada por el pin de Vin. Finalmente, la caja protectora se eligió de CrCibernetica y se buscó que tuviera un grado de protección al agua y polvo básico, debido a los ciclos de limpieza en la empresa. La caja seleccionada tiene un grado de protección de IP67.

## 5.2 Descripción de Selección software

El software empleado para el sistema consta de dos plataformas principales: ESPHome y Homeassistant, las cuales se explican a continuación. Luego de esto en la sección de programación y lógica de control se plantea de manera específica el acercamiento que se tuvo a la hora de diseñar los programas.

### 5.2.1 ESPHome

ESPHome es una plataforma que facilita la configuración y control de dispositivos basados en microcontroladores ESP8266 y ESP32 para aplicaciones de IoT. Es de suma utilidad ya que está extensamente documentada. Permite la integración rápida y sencilla de sensores, actuadores, y otros dispositivos en una red local, sin necesidad de ser un experto en el tema.

ESPHome utiliza un formato de configuración YAML, lo que hace que el proceso de agregar y gestionar dispositivos sea accesible incluso para usuarios con conocimientos básicos de programación. El archivo YAML se puede editar en cualquier editor de código, pero en Homeassistant se dispone de un editor de código integrado con la facilidad de actualizar el dispositivo por medio de OTA (Over the Air Updates).

La plataforma genera automáticamente el código y lo carga en los dispositivos ESP a través de una conexión directa o por medio de una red Wi-Fi, transformando cualquier ESP en un dispositivo inteligente capaz de recopilar datos y ejecutar automatizaciones locales o en la nube [48].

Una de las grandes ventajas de ESPHome es su flexibilidad y personalización, ya que soporta una amplia gama de sensores y actuadores como plantillas. Los usuarios pueden configurar automatizaciones locales sin depender de servicios en la nube, lo que mejora la privacidad y el tiempo de respuesta en las interacciones con los dispositivos.

### **5.2.2 Homeassistant**

Home Assistant es una plataforma de automatización del hogar (De la misma clase de apple home o Alexa) de código abierto diseñada para gestionar y controlar dispositivos inteligentes. Ofrece una solución centralizada para integrar dispositivos de diferentes fabricantes en un solo sistema, permitiendo la automatización y el control desde un solo punto. Home Assistant se ejecuta localmente, lo que significa que no depende de servicios en la nube para su funcionamiento, lo que proporciona mayor privacidad y seguridad.

Una de las características más poderosas de Home Assistant es su capacidad para automatizar tareas mediante un lenguaje de configuración simple basado en YAML, que es el mismo que utiliza ESPHome.

También permite monitoreo remoto, envío de notificaciones y gráficos detallados del estado de los dispositivos conectados, lo que ofrece una visión completa del sistema en tiempo real.

En Homeassistant, una automatización es un conjunto de acciones que se ejecutan automáticamente en respuesta a ciertos eventos o condiciones predefinidas, como cambios en un sensor o la activación de un botón. Estas automatizaciones constan de un disparador que inicia la acción, una condición opcional que debe cumplirse para ejecutarla, y las acciones específicas que se realizarán, como encender un dispositivo o enviar una notificación. Esto permite crear sistemas inteligentes para controlar dispositivos, regular condiciones y responder a eventos automáticamente. [49]

Para la implementación de Homeassistant se eligió utilizar su forma de sistema operativo, la cual es un sistema operativo diseñado específicamente para ejecutar Home Assistant. Al instalar Home Assistant OS en una Raspberry Pi, esta se convierte en un controlador central para gestionar y automatizar dispositivos inteligentes en el hogar. Home Assistant OS permite instalar complementos adicionales, como ESPHome, o configuraciones de acceso remoto. Además, incluye un sistema de supervisión para gestionar los recursos del hardware, realizar copias de seguridad y restauraciones.

## 5.3 Programación y lógica de control

Con respecto a los archivos de programación como tal se quieren describir tres aspectos del sistema: el código empleado por el esp8266, la interfaz gráfica en homeassistant, y las automatizaciones programadas. El código del esp8266 tiene la funcionalidad de medición de datos, definición de actuadores y de comunicación de estos hacia la computadora central con el homeassistant. La interfaz gráfica tiene el propósito de mostrar los datos hacia el usuario, y además de proporcionar entradas para el funcionamiento de las automatizaciones. Por último, las automatizaciones corren en el homeassistant y son las que llevan a cabo la lógica de control del sistema.

### 5.3.1 Código de esp8266

El código integrado en el dispositivo esp8266 se adjunta en el Apéndice 9.3 al final del documento. Este código se encarga de múltiples funciones. Primeramente, soporta la parte de conectividad, esto incluye WIFI para conectarse con la red de la empresa y hostear una página web en donde se accede a las funcionalidades del módulo de manera directa. Esta página web corresponde a una parte importante del sistema ya que se pueden visualizar todos los dispositivos declarados, tanto sensores como actuadores. Desde esta interfaz se calibran los sensores, proceso que será descrito más adelante.

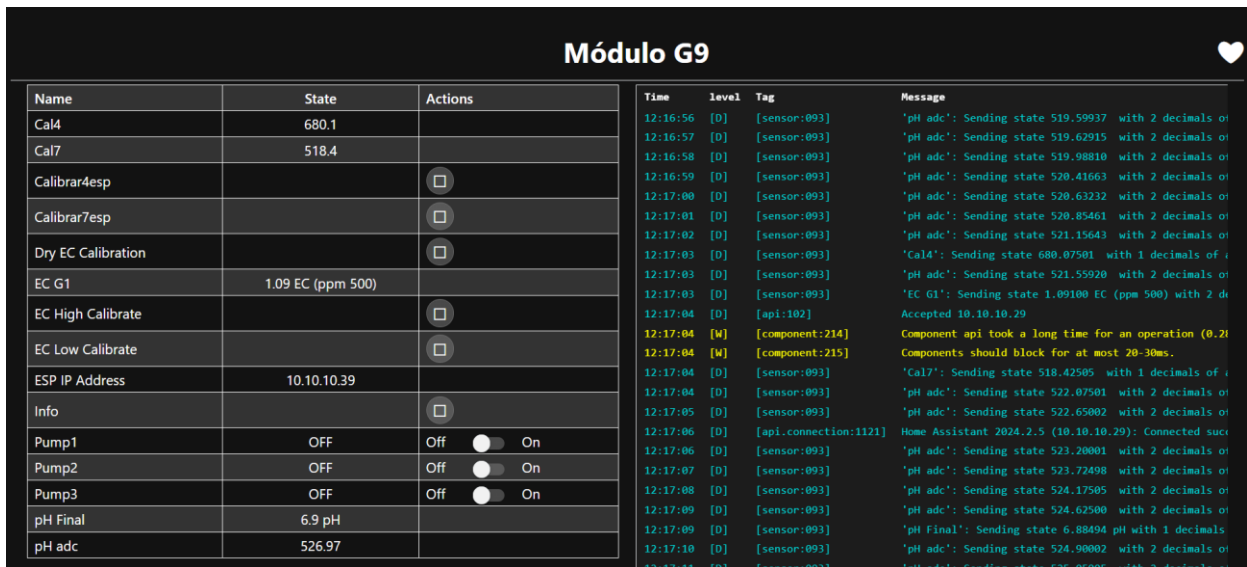


Figura 5.3.1.1 Interfaz gráfica para el módulo esp8266 [Elaboración Propia] ,

También incluye la parte de comunicación MQTT con el raspberry pi que tiene Homeassistant como sistema operativo. Como se explicó anteriormente en el marco teórico, MQTT es un sistema que funciona por medio de nodos subscriptores y publicadores. En el caso de este sistema tanto el esp8266 como el raspberry pi son subscriptores y publicadores al mismo tiempo.

El código es el encargado de definir las tasas de muestreo, de guardar los valores empleados en la calibración de los sensores, y de convertir la medición del sensor en un valor final de pH o de EC. Por último, se generan componentes de ESPHome visualizables o importables desde Homeassistant, de manera que se pueden acceder a los sensores y actuadores (que corresponden a las bombas peristálticas) para así obtener información posteriormente o controlar estos componentes. En manera de resumen el código de ESPHome desempeña las siguientes funciones:

### Dispositivo ESPHome

- esphome: Configura el nombre del dispositivo.

## **Hardware ESP8266**

- esp8266: Define la placa como nodemcu2 y habilita la restauración desde la memoria flash, lo cual permite guardar valores de manera permanente.

## **Variables Globales**

- cal4 y cal7: Variables flotantes con valores de calibración iniciales para pH que se restauran desde la memoria flash. Estos valores son sobrescritos en el proceso de calibración.

## **Registro de Eventos**

- logger: Habilita la función de registro para depuración en el ambiente de ESPHome.

## **API de Home Assistant**

- api: Activa la API de Home Assistant con cifrado de datos, esto para poder acceder a los sensores y actuadores desde homeassistant. Cabe destacar que dentro de esta API se utiliza la comunicación por parte de MQTT.

## **Actualizaciones OTA**

- ota: Permite actualizaciones por aire (OTA) con una contraseña para seguridad.

## **Conexión Wi-Fi**

- wifi: Configura el SSID y la contraseña de forma segura por medio de secretos.
- manual\_ip: Asigna una IP estática, puerta de enlace y subred para el dispositivo.
- ap: Habilita un punto de acceso de respaldo en caso de fallos de conexión, esto no tiende a suceder.

## **Servidor Web**

- web\_server: Habilita un servidor web en el puerto 80 para acceso local, aquí es en donde se tiene acceso a la interfaz gráfica de la figura 5.3.1.

## **Portal Cautivo**

- captive\_portal: Activa un portal cautivo para configuración inicial.

## **Interfaz I2C**

- `i2c`: Define pines para SDA (D2) y SCL (D1) y activa el escaneo automático. Este es el método de comunicación utilizado por el sensor digital de EC.

## **Sensores**

- `adc`: Configura un sensor ADC para pH en el pin A0, con filtros de promedios móviles y medianas. Este pin se utiliza para el sensor analógico de pH.
- `template (Cal4 y Cal7)`: Crea sensores de plantilla para mostrar los valores de calibración, actualizados cada 10 segundos.
- `template (pH Final)`: Calcula el pH ajustado usando `cal4` y `cal7`, con un filtro de promedio móvil. Para calcular el pH Final se utiliza la fórmula de la ecuación 5.1 que se describe en la siguiente sección en la parte de calibración.
- `ezo (EC G1)`: Configura un sensor EZO para medir la conductividad eléctrica (EC), con conversión a ppm.

## **Sensor de Texto**

- `wifi_info`: Muestra la dirección IP del dispositivo, en el caso que se quiera acceder a la interfaz gráfica que tiene el `esp8266`.

## **Salidas GPIO para Bombas**

- `output (Pump1, Pump2, Pump3)`: Define salidas para controlar tres bombas en los pines D5, D6 y D7 con lógica invertida.

## **Interruptores para Bombas**

- `switch`: Asocia cada bomba a un interruptor para control desde ESPHome. Estos tres switches son entidades que son importadas desde Homeassistant.

## **Botones para Calibración y Comandos**

- `Calibrar4esp` y `Calibrar7esp`: Botones que asignan el valor actual del pH al valor de calibración `cal4` o `cal7`, que será guardado en la memoria flash.

- Dry EC Calibration, EC High Calibrate, EC Low Calibrate: Botones para calibrar el sensor de EC en modos seco, alto y bajo.
- Info: Botón que envía el comando de información al sensor EC.

### **5.3.2 Interfaz gráfica en Homeassistant**

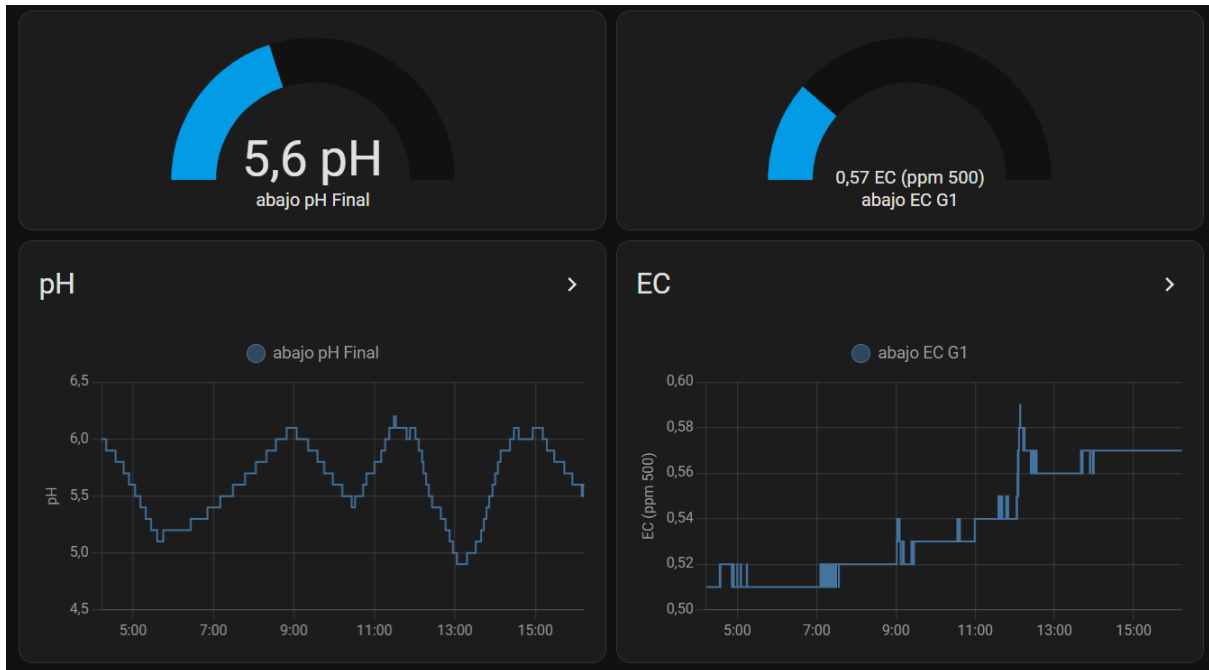
Para el diseño de la interfaz gráfica en Homeassistant se basó en los principios de la norma ISO 9241-210 de UX/UI. [40] Estos incluyen el diseño centrado en el usuario (UCD), la consistencia en el diseño y la minimización de la complejidad cognitiva.

El diseño centrado en el usuario se implementó tomando como referencia los comportamientos de los funcionarios de la empresa, sus perfiles profesionales, las necesidades vocalizadas por el cliente y como interactúan de manera actual con el sistema los funcionarios.

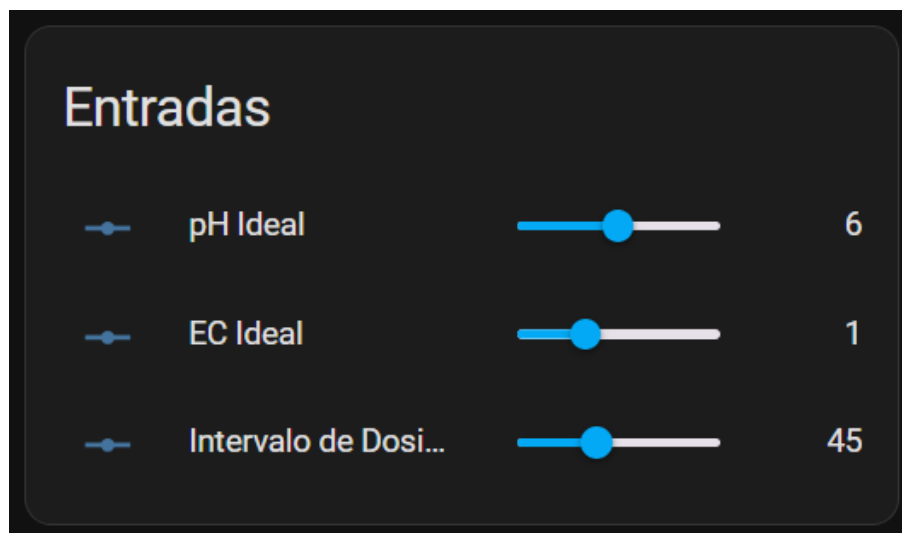
La consistencia en el diseño se buscó manteniendo una coherencia visual y funcional en los elementos de la interfaz para que el usuario navegue el sistema de manera eficiente. Esto incluye patrones repetibles, tipografías, colores, y ubicaciones de elementos comunes o parecidos.

La minimización de la complejidad cognitiva se buscó de manera que el diseño fuera minimalista, teniendo la menor cantidad de botones, switches y texto. Además, esto se logra agrupando elementos relacionados y utilizando jerarquías visuales claras, resultando en una UX/UI en la que el usuario no tenga que esforzarse para comprender el sistema y utilizarlo.

A continuación, en las figuras 5.3.2.1. y 5.3.2.2. se muestra la interfaz de usuario creada para el sistema.



**Figura 5.3.2.1.** Dashboard o Interfaz gráfica principal en Homeassistant [Elaboración Propia].

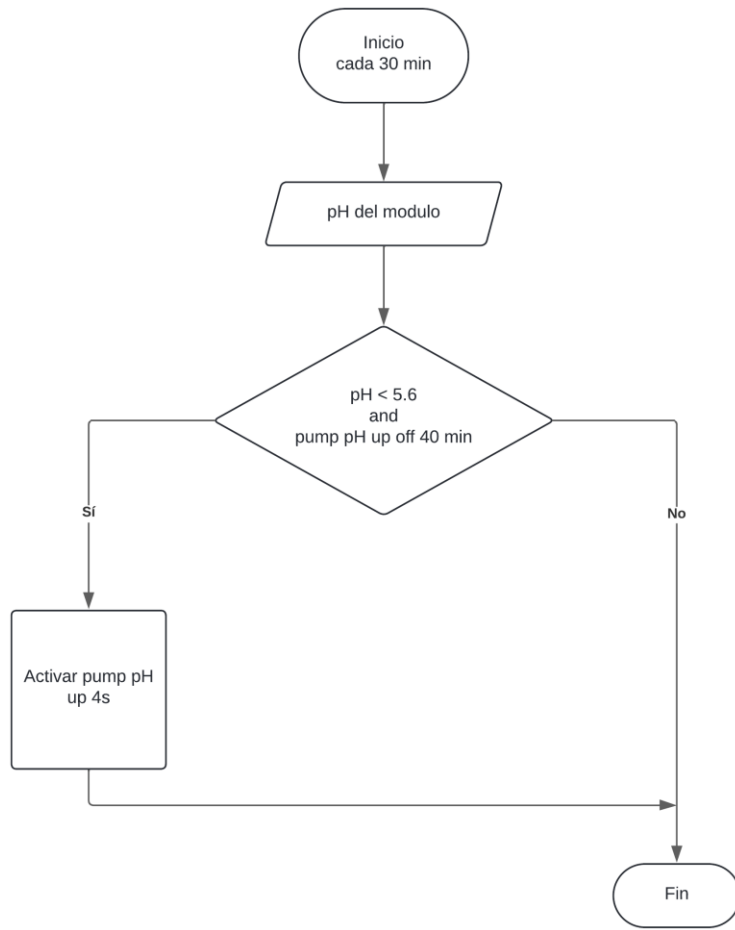


**Figura 5.3.2.2.** Entrada del usuario en la interfaz [Elaboración Propia].

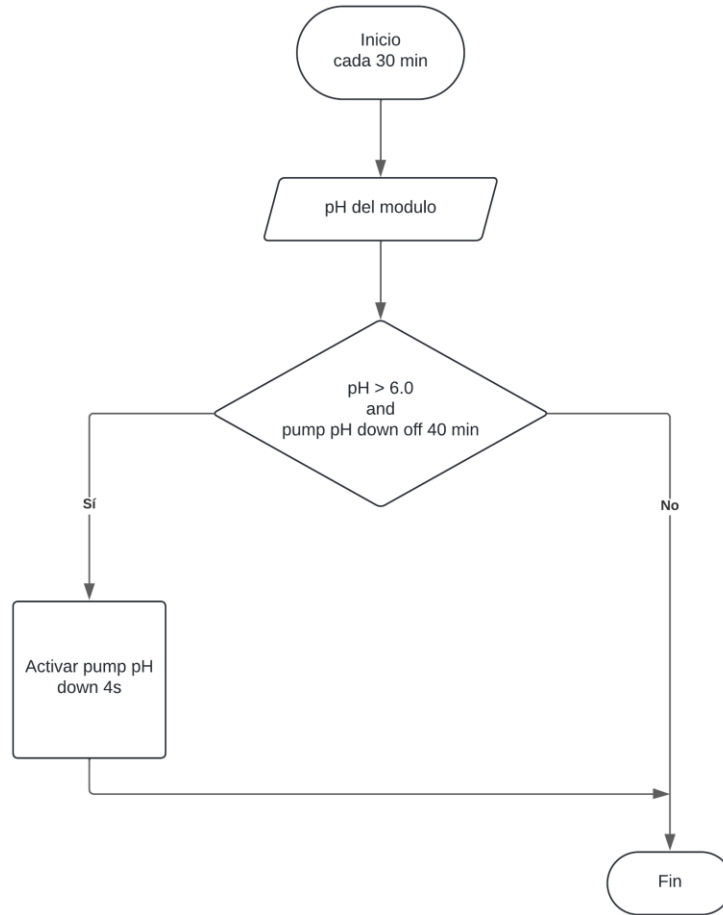
Como parte de la interfaz gráfica se observan dos indicadores en forma de aguja que dan las últimas mediciones de pH y EC en el sistema. Además de esto se muestran dos gráficos históricos de las mediciones de pH y EC de las últimas 12 horas. En la figura 5.3.2.2. se observan las entradas manuales del sistema para elegir ciertos aspectos de la configuración, más específicamente los valores de pH y EC ideales, y el intervalo de dosificación. En el Apéndice 9.4 se muestra el código utilizado para la interfaz gráfica del sistema.

### **5.3.3 Automatizaciones**

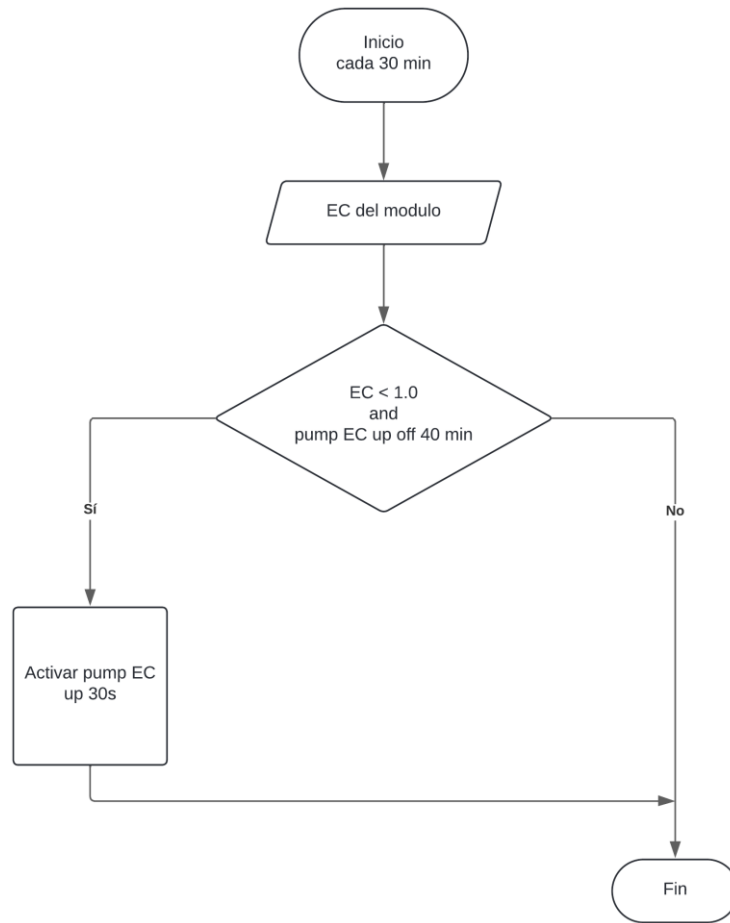
Las automatizaciones del sistema son tal vez la parte más significativa del código, debido a que formalizan las necesidades del cliente con respecto a los rangos esperados tanto para el pH como para la EC en el sistema. Se desarrollaron 4 automatizaciones: control de pH bajo, control de pH alto, control de EC bajo, y una automatización para el envío de notificaciones. A continuación, en las figuras 5.3.3.1, 5.3.3.2, 5.3.3.3, y 5.3.3.4 se muestran los diagramas de flujo para cada una de las automatizaciones mencionadas. En el Apéndice 9.5 se muestra el código de manera explícita para estos flujos.



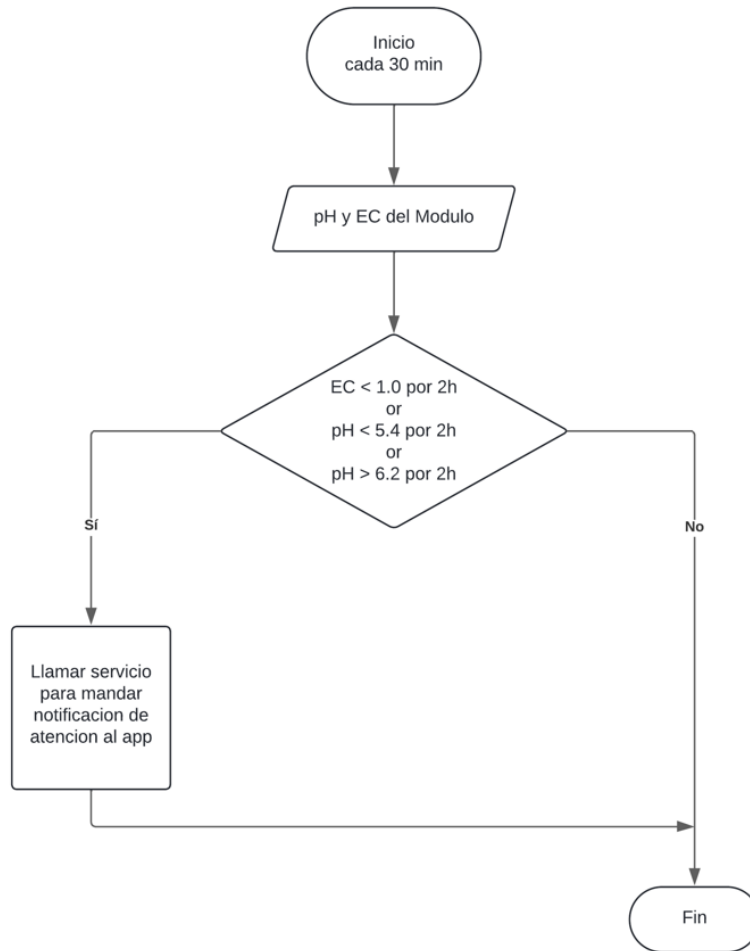
**Figura 5.3.3.1.** Diagrama de flujo Automatización Control de pH bajo [Elaboración Propia] .



**Figura 5.3.3.2.** Diagrama de flujo Automatización Control pH alto [Elaboración Propia] .



**Figura 5.3.3.3.** Diagrama de flujo Automatización Control de EC bajo [Elaboración Propia] .



**Figura 5.3.3.4.** Diagrama de flujo Automatización Envío de notificaciones [Elaboración Propia] ..

## 5.4 Integraciones y aspectos adicionales

### 5.4.1 Montaje del sistema

Para el montaje físico se utilizó como base la caja protectora de la tabla 5.1.3. Esta tiene protección IP67. La clasificación IP67 asegura que un dispositivo es completamente resistente al polvo y puede soportar inmersión en agua hasta 1 metro de profundidad durante 30 minutos. [46] A partir de esta caja protectora se introdujeron todos los componentes necesarios, se hicieron las conexiones planteadas, y finalmente se cerró la caja dejando el sistema bajo protección de accidentes en el ambiente del local.

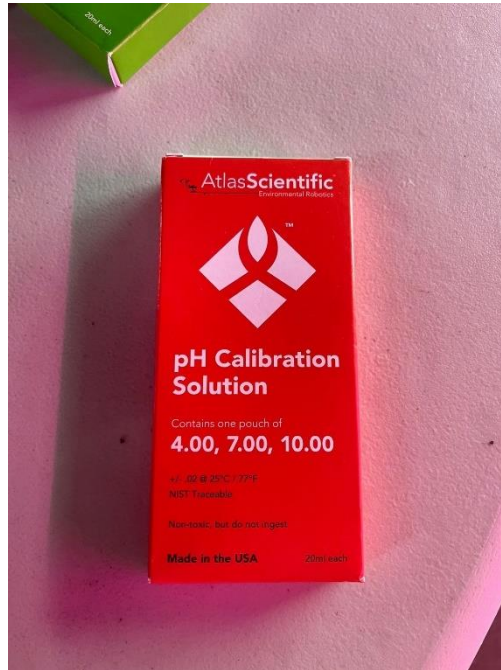
### **5.4.2 Filtrado de datos**

El procesamiento de señales fue requerido en los valores obtenidos por el sensor de pH, mas no el de EC. Esto sucedió debido a que el sensor analógico de pH no tenía aislamiento eléctrico, de manera que existían fluctuaciones constantes en las mediciones, provocadas por la bomba en el tanque de agua utilizada para circular el agua en el estante hidropónico. Para lidiar con este problema se implementaron 2 filtros, los cuales están explicados en el marco teórico del proyecto: el filtro de mediana y el filtro de media móvil. El filtro de mediana es especialmente útil para lidiar con el ruido que es no-gaussiano y de alta intensidad. [35] Además de esto, el filtro de media móvil ayudó cuando el ruido tiene un comportamiento uniforme. [36]

### **5.4.3 Calibración pH y EC**

La calibración de los sensores es algo de suma importancia para el correcto funcionamiento del sistema. Tanto los sensores utilizados, como los sensores de mano requieren ser calibrados para tomar lecturas correctas.

Para el caso del pH, se utiliza una calibración de 2 puntos con soluciones de 4 pH y 7 pH para ser exactos. Existe la calibración de 3 puntos, en donde se añade un tercer punto de referencia a los 10 pH, pero según las indicaciones de los profesionales de la empresa esto no era necesario. Las soluciones de calibración se pueden ver en la figura a continuación.



**Figura 5.4.3.1.** Kit de Calibración de pH [Elaboración Propia] <sup>12</sup>

La calibración se realiza dentro de la interfaz gráfica de Esphome (figura 5.3.1). Aquí se presiona el botón de calibración en 4 pH y calibración en 7 pH para guardar estos valores en la memoria flash del esp8266. Luego de esto se realiza una conversión matemática por medio la formula descrita a continuación que convierte el valor medido por el sensor en su equivalente de pH.

$$7 - \frac{3 * (ph_{sensor} - cal7)}{cal4 - cal7} \quad (5.1)$$

En donde pH\_sensor corresponde al valor medido por el sensor analógico, y cal4 y cal7 se refieren a los valores guardados como puntos de calibración en el esp8266.

La calibración de la EC se realiza de una manera similar con un método de 3 puntos. Se hace primero la calibración con el sensor en seco sin sumergir, lo cual debería de dar un

valor de 0 mS/cm. Luego de esto se utilizan 2 puntos de referencia adicionales que son 12,88 mS/cm, y 80 mS/cm.

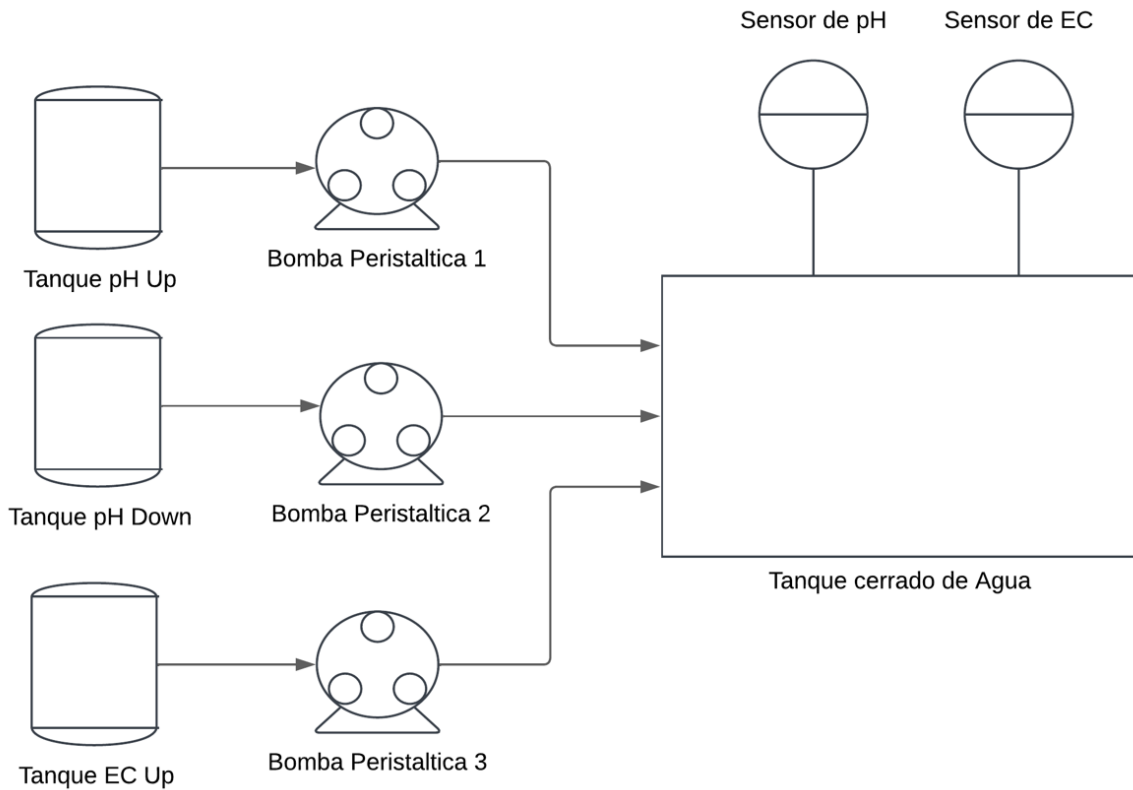
El procedimiento de calibración es el mismo, se toman los valores en el sensor para cada punto de referencia y se guardan en la memoria flash del esp8266. Luego de esto se realiza una conversión del valor de voltaje medido por el sensor, a un valor equivalente de EC. Los sensores de EC tienden a ser muy robustos, de manera que la descalibración es un problema muy poco común. En la figura 5.4.3.2 a continuación se observan las soluciones utilizadas para la calibración de EC.



**Figura 5.4.3.2.** Kit de Calibración de EC [Elaboración Propia] <sup>13</sup>

### 5.4.5 P&ID

En manera de ilustración de la solución planteada se plantea a continuación el diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) para el sistema en la figura 5.4.3.1.



**Figura 5.4.5.1.** Diagrama P&ID del sistema implementado [Elaboración Propia] .

## 5.4.6 VPN

Para mayor facilidad a la hora de desarrollar la solución, y también para una mejor experiencia de usuario por parte del cliente, se instaló una extensión en el Homeassistant de VPN. Esta conexión privada virtual permite acceder al servidor de la raspberry pi de manera remota, para poder monitorear y modificar valores sin la necesidad de estar en la empresa físicamente. El proveedor de VPN utilizado fue Zero Tier One, este tiene licencias gratis que ofrecían todo lo requerido por parte del proyecto. En la referencia [50] se puede observar el paso a paso que demuestra el proceso de configuración empleado para establecer esta conexión remota.

# *Capítulo 6. Resultados y Análisis*

## 6.1 Evaluación y Prueba de Conceptos

Finalmente se tiene la evaluación y prueba de conceptos. Esta es la última fase que se trabajara en este informe de la metodología Ulrich Eppinger. Cuando se llega a este punto, gran parte de la ruta del proyecto se tiene completa. Se tienen las necesidades formalizadas, las especificaciones definidas, el problema descompuesto en subsistemas, y una matriz de soluciones que pasan por un filtrado y luego una selección que da como resultado la combinación ganadora para la solución del problema. El siguiente paso es validar esta solución planteada. Esto permite determinar el cumplimiento de las especificaciones de una manera más realista. Una prueba de concepto es una implementación de los diferentes conceptos definidos de manera que permita hacer una idea de la operación normal del producto. Esta fase incluye normalmente la construcción de un prototipo operativo, y la definición de una serie de pruebas que permitan verificar el cumplimiento de las especificaciones. [47]

### **6.1.1 Definición de variables de muestra y establecimiento de factores de influencia**

Las variables de muestra son los aspectos medibles que se quieren verificar, que hacen referencia a las necesidades del cliente o el objetivo por cumplir. Por otro lado, los factores de influencia son fenómenos o aspectos que influyen en estas variables de muestra. A continuación, en la tabla 6.1.1.1 se definen las variables de muestra para el caso específico de la solución y sus factores de influencia correspondientes, luego de esto, en la tabla 6.1.1.2 se presentan los valores a probar para estos factores de influencia, midiendo por supuesto las variables de muestra. Cabe destacar que solo se plantearon varios factores de influencia para

la prueba de exactitud de dosificación debido a la cantidad de pruebas planteadas, y al tiempo dispuesto. Para las demás pruebas se utilizaron las condiciones del sistema sin modificación.

**Tabla 6.1.1.1.** Objetivos, variables de muestra, y factores de influencia para las pruebas de validación [Elaboración Propia]

Objetivos	Variable de muestra	Factores de influencia
Exactitud de dosificación	ml de líquido dosificado	Solución utilizada
Exactitud de medición pH	pH del sistema	EC del Sistema
Exactitud de medición EC	EC del sistema	pH del Sistema
Confiabilidad del sistema pH	Probabilidad de mantener pH en rango deseado	-
Confiabilidad del sistema EC	Probabilidad de mantener EC en rango deseado	-

**Tabla 6.1.1.2.** Valores específicos de las pruebas a realizar [Elaboración Propia]

Variable de muestra	Factores de influencia	Valores por probar
ml Dosificados	Solución utilizada	Abono, pH up, pH down
pH	EC del Sistema	1 mS/cm
EC	pH del Sistema	6
Probabilidad de mantener pH en rango deseado	-	-
Probabilidad de mantener EC en rango deseado	-	-

## 6.1.2 Definición del tamaño de muestra

Se deben de definir las pruebas como tal. Estas consisten en una para cada variable de muestra, tomando en consideración el efecto de los factores de influencia dentro del rango de valores por probar. Antes de definir las pruebas como tal, se procede a calcular el número de muestras necesario para obtener resultados confiables y representativos de la población. Se utiliza el planteamiento de estudio de proporciones, en donde se tiene la ecuación 6.1 que considera el nivel de confianza, el margen de error y la proporción esperada en la población.

$$n = \frac{Z^2 * p * (1 - p)}{E^2} \quad (6.1)$$

En donde:

n: tamaño de la muestra necesaria.

Z: valor z correspondiente al nivel de confianza deseado

p: proporción estimada de la población

E: margen de error o precisión deseada.

Para el caso de las pruebas realizadas se elige un 90% de confianza:  $Z=1.645$ . Para p como no se conoce, un valor seguro y conservador es 0.5, ya que maximiza el tamaño de la muestra necesaria. E representa la precisión deseada y se elige 10%. Para estudios exploratorios, un margen de error del 10% es suficiente para obtener resultados confiables sin incurrir en los costos de una muestra más grande, especialmente en investigaciones con recursos limitados [51] Reemplazando los valores en la ecuación 6.2 anterior se tiene:

$$n = \frac{1.645^2 * 0.5 * (1 - 0.5)}{0.10^2} = 67.65$$

A partir de este cálculo se plantea realizar 68 muestras para cada prueba. Una vez con esto definido, procede a determinar las pruebas a realizar para validar el sistema de solución planteado. Se decidió realizar 5 pruebas, 2 correspondientes a la medición de variables, 1 a la dosificación de líquidos, y 2 de la confiabilidad del sistema.

## 6.1.3 Definición de pruebas

### **6.1.3.1. Prueba 1. Exactitud en la dosificación de líquidos**

Métrica en estudio: Exactitud de dosificación de líquidos (8,9)

Definición de la prueba: Se plantea una prueba en donde se accionan las bombas por el tiempo calculado de 3s para así poder obtener la dosis requerida por la empresa de 5ml. Se realiza este proceso 68 veces para cada fluido de dosificación. Cada dosificación se mide con el instrumento de medición utilizado por la empresa para medir la dosis de 5ml, que corresponde a una probeta. Luego de esto se compara la dosis patrón con las dosis experimentales y se obtiene un porcentaje de error. Se define un porcentaje de error menor al 5% como un éxito en la prueba.

### **6.1.3.2. Prueba 2. Exactitud en la medición del pH**

Métrica en estudio: Exactitud de las mediciones de los sensores (4) pH

Definición de la prueba: Se plantea la medición del tanque de agua hidropónico en 68 momentos diferentes, en intervalos de 5 minutos, para el sistema hidropónico sin cultivos ni dosificaciones externas, de manera que las condiciones del agua se mantienen relativamente uniformes. Esto se realiza para la condición de EC del tanque: 1.0 mS/cm. Se mide simultáneamente con el medidor manual que corresponde al método actual de la empresa y por ende el patrón. Luego de esto se comparan las mediciones del medidor manual, con las mediciones del sensor del sistema, y a partir de esto se calcula un porcentaje de error. Se define un porcentaje de error menor al 2% como un éxito en la prueba.

#### **6.1.3.3. Prueba 3. Exactitud en la medición del EC**

Métrica en estudio: Exactitud de las mediciones de los sensores (4) EC

Definición de la prueba: Se plantea la medición del tanque de agua hidropónico en 68 momentos diferentes, en intervalos de 5 minutos, para el sistema hidropónico sin cultivos, de manera que las condiciones del agua se mantienen uniformes. Esto se realiza para la condición de pH del tanque: 6 pH. Se mide simultáneamente con el medidor manual que corresponde al método actual de la empresa y por ende el patrón. Luego de esto se comparan las mediciones del medidor manual, con las mediciones del sensor del sistema, y a partir de esto se calcula un porcentaje de error. Se define un porcentaje de error menor al 2% como un éxito en la prueba.

#### **6.1.3.4. Prueba 4. Confiabilidad para mantener pH**

Métrica en estudio: Confiabilidad del sistema (12) para pH

Definición de la prueba: Se plantea una prueba en donde se pone a funcionar el sistema completo en el estante de hidroponía de 5 pisos. Se introducen dosificaciones externas en momentos aleatorios para subir el pH o bajarlo con dosis de 10 ml. Se considera como error la medición fuera del rango de pH elegido por la empresa de 5.4 a 6.2 pH. Se define una probabilidad de mantener el pH en el rango aceptado de 90% como un éxito en la prueba. 68 muestras son tomadas cada 30 minutos.

#### **6.1.3.5. Prueba 5. Confiabilidad para mantener EC**

Métrica en estudio: Confiabilidad del sistema (12) para EC

Definición de la prueba: Se plantea una prueba en donde se pone a funcionar el sistema completo en el estante de hidroponía de 5 pisos. Debido al ciclo de vida de las plantas la EC del agua tiende a decrecer. Se considera como error las mediciones por debajo del límite de

EC elegido por la empresa de 1.0 mS/cm. Se define una probabilidad de mantener el pH en el rango aceptado de 90% como un éxito en la prueba. 68 muestras son tomadas cada 30 minutos.

## 6.1.4 Resultados de las pruebas

A continuación, para cada prueba de validación se muestran los resultados obtenidos en forma gráfica en las siguientes figuras. Las tablas de los datos sin procesar se encuentran en el Apéndice 9.6. El error calculado para las pruebas en donde se obtiene un porcentaje de error se plantea con el patrón actual de la empresa como valor verídico. Es decir, las mediciones de los medidores manuales se consideran el patrón, tanto en las pruebas de pH, como en las de EC y dosificación de fluidos.

### 6.1.4.1. Prueba 1. Exactitud en la dosificación de líquidos

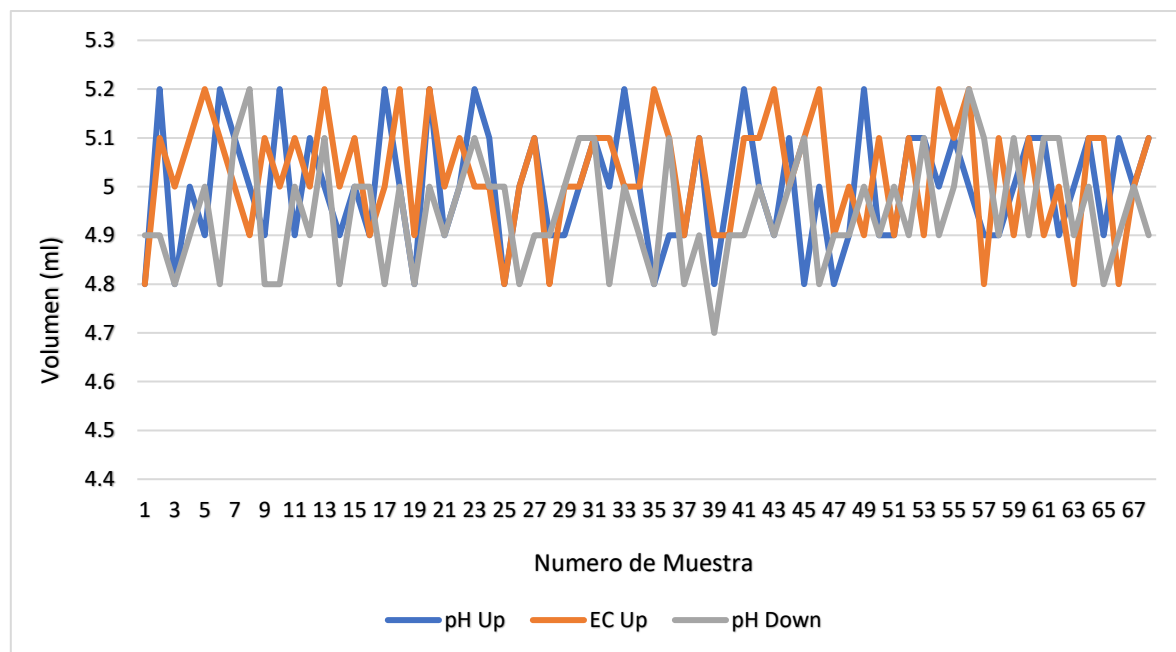


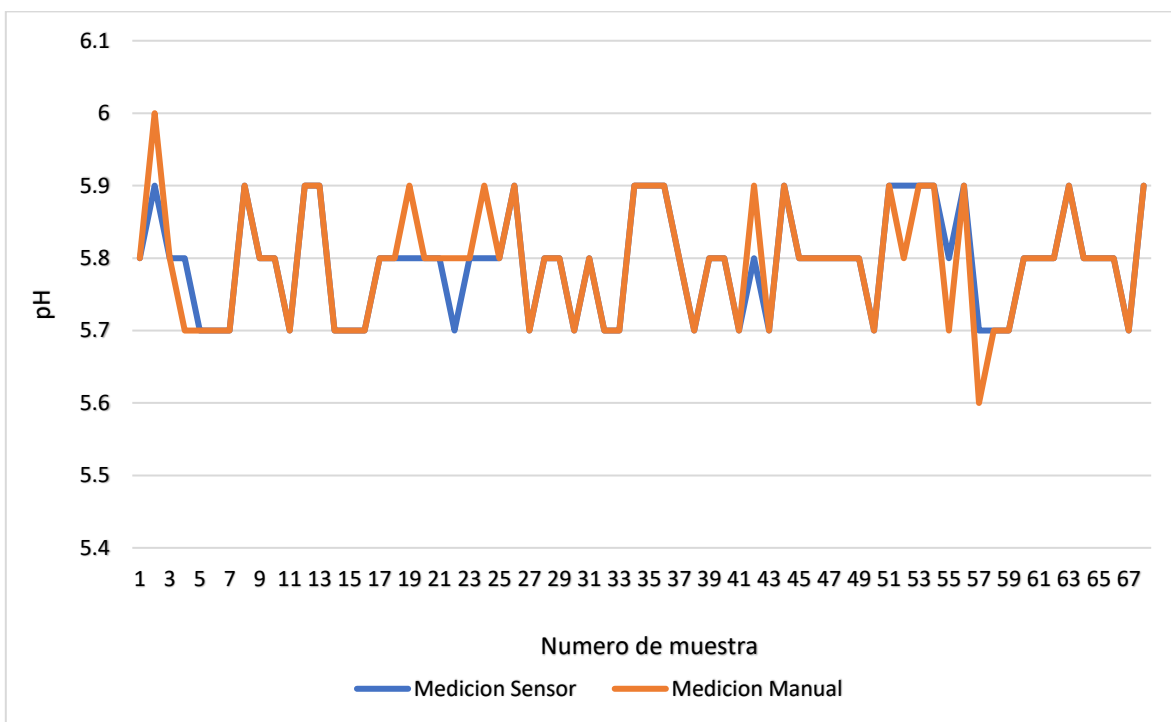
Figura 6.1.4.1. Resultados en prueba de dosificación de fluidos [Elaboración Propia].

**Tabla 6.1.4.1.** Porcentaje de error obtenido para los tres fluidos [Elaboración Propia].

pH Up	EC Up	pH Down
1.97	1.91	1.97

Considerando los porcentajes de error obtenidos que son ligeramente menores a 2%, y el criterio de éxito planteado anteriormente de 5%, se tiene que el sistema ha pasado esta prueba con éxito. Se aprecia como todas las bombas dosifican de manera variable teniendo la dosis planteada como punto medio de referencia.

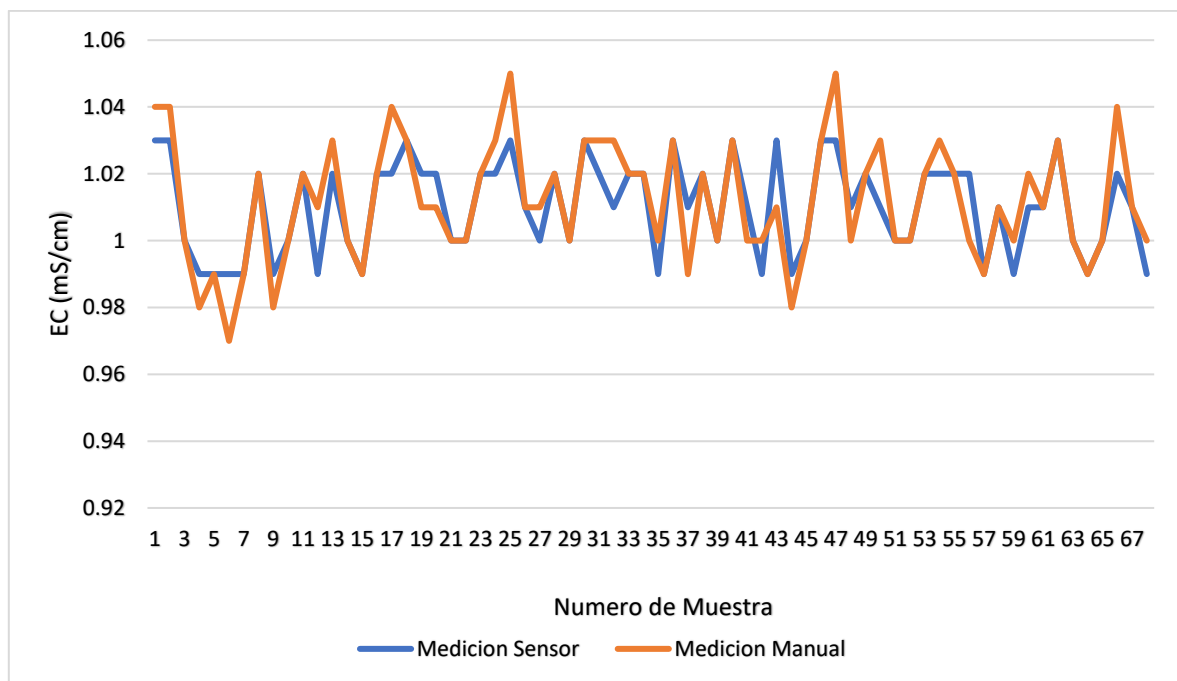
**6.1.4.2. Prueba 2. Exactitud en la medición del pH**



**Figura 6.1.4.2.** Resultados obtenidos para prueba de exactitud en medición de pH [Elaboración Propia].

En la gráfica anterior se observa como la curva del sensor del sistema y la medición manual están superpuestas en la mayoría de las mediciones. Esto quiere decir que las lecturas fueron las mismas. Cuando la lectura no fue la misma se dio por un error de 0.1 en la escala de pH, es decir, la medición contigua. El porcentaje de error resultante es de 0.23 %, como es menor al 2 % planteado se cumple esta segunda prueba con éxito.

#### 6.1.4.3. Prueba 3. Exactitud en la medición del EC

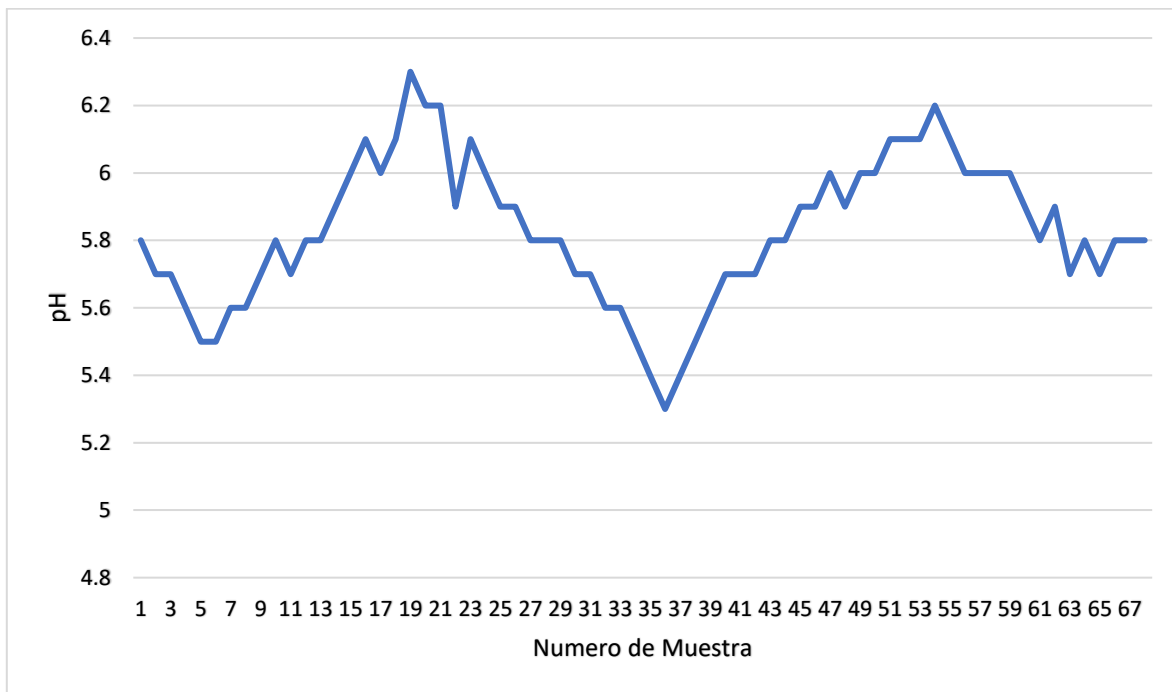


**Figura 6.1.4.3.** Resultados obtenidos para prueba de exactitud en medición de EC [Elaboración Propia]<sup>17</sup>

En la gráfica anterior se observa como la curva del sensor del sistema y la medición manual para el EC están superpuestas de igual manera. Esto quiere decir que las lecturas fueron las mismas para estas muestras. Cuando la lectura no fue la misma se dio por un error de 0.02 mS/cm en la escala de EC, lo cual es un error muy aceptable. El porcentaje de error

resultante para la prueba es de 0.61 %, como es menor al 2 % planteado se cumple esta tercera prueba con éxito.

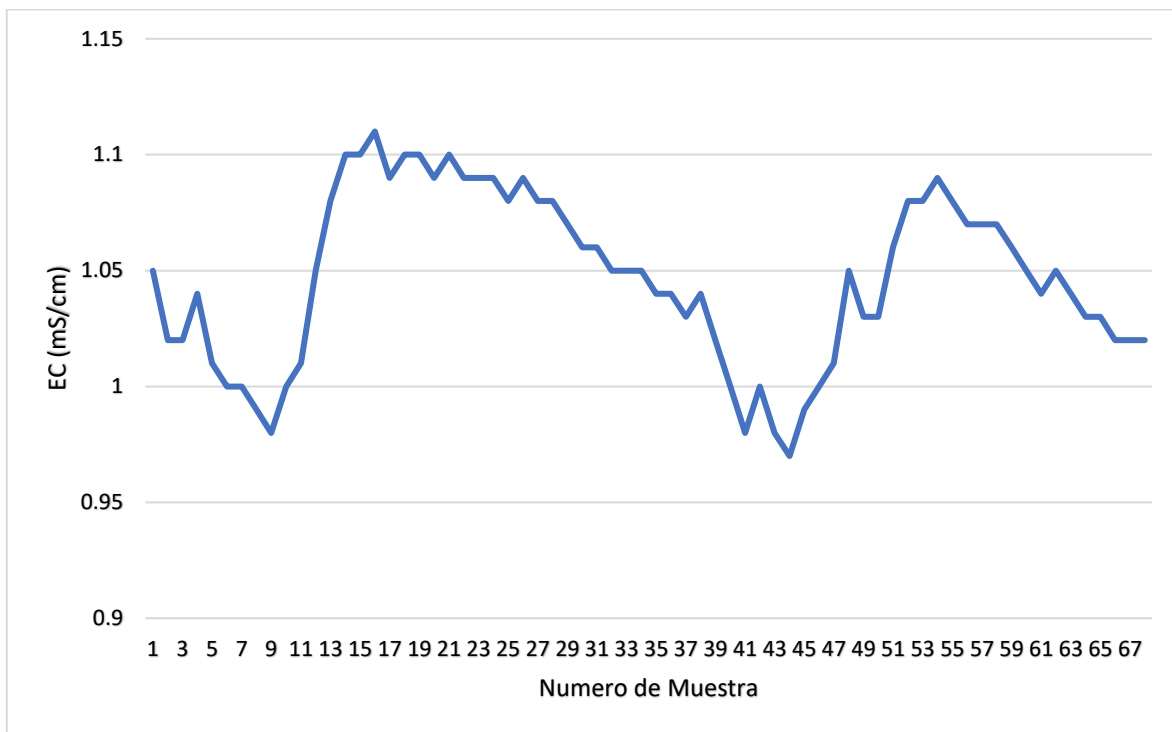
#### 6.1.4.4. Prueba 4. Confiabilidad para mantener pH



**Figura 6.1.4.4.** Resultados obtenidos para prueba de confiabilidad del sistema para pH [Elaboración Propia].

En la figura anterior se denota el comportamiento funcional del sistema para controlar pH. Se inicio con 5.8 de pH. Únicamente se tuvieron 2 valores fuera del rango considerado para el error del sistema. Tomando en consideración las 68 muestras totales esto representa una confiabilidad del sistema de 97.06 % en la prueba planteada, que como es mayor al 90% propuesto, se considera un éxito.

#### 6.1.4.5. Prueba 5. Confiabilidad para mantener EC



**Figura 6.1.4.5.** Resultados obtenidos para prueba de confiabilidad del sistema para EC [Elaboración Propia].<sup>19</sup>

Finalmente, tomando en consideración la figura del comportamiento del sistema para controlar la EC, se tiene que se presentó un comportamiento esperado. La funcionalidad se aprecia cuando se cruza el límite de 1 de EC, lo cual acciona la dosificación en el siguiente ciclo. Se obtuvieron 62 muestras dentro del rango propuesto aceptado, de manera que esto da una confiabilidad del sistema de 91.18 %, que al ser superior al 90 % planteado se considera un éxito.

## 6.2. Análisis Económico

Un análisis económico es fundamental para evaluar la viabilidad y rentabilidad de un proyecto, ya que permite determinar si la inversión generará beneficios suficientes sobre el capital invertido en un periodo determinado. Un proyecto siempre debe justificar como aporta un beneficio sobre las soluciones actualmente existentes, o sobre la inacción. No necesariamente tiene que ser en términos de dinero, pero si en los recursos necesarios para el proyecto, y los recursos o beneficios generados por el proyecto. Para cuantificar la rentabilidad de este proyecto se utilizan los conceptos de VAN y TIR.

A continuación, se muestran los cálculos realizados para obtener los costos de la inversión inicial, y de los ingresos y egresos anuales.

**Tabla 6.3.1** Desglose de inversión inicial para un módulo [Elaboración Propia]

<b>Materiales y Mano de obra</b>	<b>Precio (\$)</b>
Fuente conmutada	5.95
Tuberías de Silicona	8
Bomba Peristáltica (3)	29.94
Sensor Digital	165.99
Sensor Analógico	69.99
ESP8266	9.95
Tanques de reserva	6
Relays	6.95
Cables (AWG 24)	5
Buck Converter	4.95
Caja protectora	11.95
Horas de diseño (30h una sola vez)	240
Raspberry pi 4 (computadora)	95.95
<b>Total</b>	<b>660.62</b>

**Tabla 6.3.2.** Costos de la inversión inicial [Elaboración Propia].

<b>Inversión Inicial</b>	<b>Precio (\$)</b>
1 módulo	660.62
5 módulos	1959.3
15 módulos	5206

**Tabla 6.3.3.** Egresos Anuales del Proyecto [Elaboración Propia]

<b>Egresos anuales</b>	<b>1 módulo</b>	<b>5 módulos</b>	<b>15 módulos</b>
Mantenimiento	38.4	192	576
Repuestos	50	250	750
Electricidad	11.68	58.4	175.2
Total	100.08	500.4	1501.2

**Tabla 6.3.4.** Ingresos Anuales del Proyecto [Elaboración Propia]

<b>Ingresos Anuales</b>	<b>1 modulo</b>	<b>5 módulos</b>	<b>15 módulos</b>
Mano de obra	499.2	2496	7488

Una vez planteados estos costos, se procede a calcular los flujos de caja netos, y con estos, los valores de los indicadores VAN y TIR. Cabe destacar que se utilizó una tasa de descuento del 10%. Una tasa de descuento del 10% se alinea con el costo del capital común en varias industrias, lo que la hace una estimación práctica para proyectos estándar. [52] Se plantearon tres casos, en donde se desarrollan e implementan 1, 5, y 15 módulos concretamente. Estos tres casos se plantearon debido a que actualmente se está implementando un módulo como prototipo. En el local hay 5 estantes hidropónicos que se quieren automatizar entonces este es ese segundo caso. Y por último existe un proyecto en un futuro cercano para el cual se quisieran instalar 15 módulos, de manera que se consideran estos tres casos para ver el impacto económico.

**Tabla 6.3.5.** Indicadores de Rentabilidad 1 Módulo [Elaboración Propia]

<b>1 módulo</b>	<b>0 año</b>	<b>1 año</b>	<b>2 año</b>	<b>3 año</b>	<b>4 año</b>	<b>5 año</b>	<b>VAN</b>	<b>TIR</b>
Ingresos		499.2	499.2	499.2	499.2	499.2		
Egresos	660.62	100.08	100.08	100.08	100.08	100.08		
Flujos de caja	-660.62	399.12	399.12	399.12	399.12	399.12	\$ 852.36	53%

**Tabla 6.3.6.** Indicadores de Rentabilidad 5 Módulos [Elaboración Propia]

<b>5 módulos</b>	<b>0 año</b>	<b>1 año</b>	<b>2 año</b>	<b>3 año</b>	<b>4 año</b>	<b>5 año</b>	<b>VAN</b>	<b>TIR</b>
Ingresos 5		2496	2496	2496	2496	2496		
Egresos 5	1959.3	500.4	500.4	500.4	500.4	500.4		
Flujos de caja	-1959.3	1995.6	1995.6	1995.6	1995.6	1995.6	\$ 5,605.59	99%

**Tabla 6.3.7.** Indicadores de Rentabilidad 15 Módulos [Elaboración Propia]

<b>15 módulos</b>	<b>0 año</b>	<b>1 año</b>	<b>2 año</b>	<b>3 año</b>	<b>4 año</b>	<b>5 año</b>	<b>VAN</b>	<b>TIR</b>
Ingresos		7488	7488	7488	7488	7488		
Egresos	5206	1501.2	1501.2	1501.2	1501.2	1501.2		
Flujos de caja	-5206	5986.8	5986.8	5986.8	5986.8	5986.8	\$ 17,488.68	112%

Como se puede observar, tanto el VAN como el TIR para los casos planteados tienen resultados muy prometedores. El VAN es positivo para todos los casos, lo cual quiere decir que para la tasa de descuento elegida del 10% se obtiene un retorno positivo sobre la inversión inicial en el plazo de 5 años. El TIR que corresponde a la tasa de retorno para el cual el VAN es igual a 0 dio como resultado tasas muy altas, lo cual es positivo de igual manera ya que se esperaba que fuera mayor a 10%.

Cabe destacar que como caso limite, el implementar los módulos comienza a ser rentable a partir del segundo año, lo cual es ideal tomando en consideración los 5 años en los cuales se tenía pensado inicialmente. Un punto importante también es que el sistema sigue generando ingresos en forma de recursos ahorrados mientras se mantenga en funcionamiento, incluso pasados estos 5 años. De manera intuitiva también se tiene que mientras más módulos se implementan, la rentabilidad del proyecto aumenta.

# *Capítulo 7. Conclusiones y Recomendaciones*

## 7.1 Conclusiones

1. **Eficiencia operativa:** La implementación del sistema automatizado de control de pH y EC ha demostrado mejorar la eficiencia operativa, reduciendo la necesidad de mediciones manuales y ajustando las condiciones automáticamente según las necesidades que tiene el ambiente de cultivo.
2. **Rentabilidad escalable:** Los análisis económicos muestran que el sistema es económicamente rentable, y que la rentabilidad además aumenta proporcionalmente con la cantidad de módulos implementados, comenzando a generar beneficios netos a partir del segundo año. Esto hace que la expansión del sistema sea una inversión viable y rentable a largo plazo.
3. **Exactitud en las mediciones:** Los sensores y el sistema de calibración permiten orientar al sistema para mantener el pH y la EC dentro de los rangos deseados. Esto es fundamental para asegurar un ambiente adecuado de crecimiento para las plantas.
4. **Facilidad de uso y accesibilidad:** La integración con Home Assistant y la opción de acceso remoto mediante VPN permiten a los operadores monitorear y ajustar los parámetros desde cualquier ubicación, brindando flexibilidad y conveniencia en la operación diaria.
5. **Análisis del proceso de cultivo:** Se realizó un análisis del proceso de cultivo hidropónico actual que desarrolla la empresa, y se consideró el potencial de automatización que tiene cada una de estas partes en el apéndice 9.1.
6. **Selección de hardware:** A partir de la metodología planteada se utilizaron los criterios técnicos del capítulo 4 para así poder seleccionar el hardware adecuado para medir y controlar las variables deseadas en el sistema hidropónico según las necesidades del cliente.

7. **Diseño de archivos de programación:** Se diseñaron de manera satisfactoria los programas lógicos, de comunicación, y de interfaz para el sistema de manera que este cumpliera con las necesidades planteadas por el cliente.
8. **Validación del sistema:** Se validó el sistema mediante 5 pruebas diferentes que permitieron comprobar las funcionalidades de medición, dosificación, y control de la máquina.

## 7.2 Recomendaciones

1. **Actualización de sensores:** Se recomienda cambiar el sensor de pH de tipo analógico por uno digital para mejorar la precisión y reducir la susceptibilidad al ruido.
2. **Desarrollo de PCB personalizado:** Diseñar un PCB que integre todos los componentes del sistema en una sola unidad, reduciendo el espacio y mejorando la organización y mantenimiento del sistema.
3. **Dosificación proporcional:** Integrar un sistema de dosificación proporcional de pH y EC que permita ajustes más precisos según la cantidad de solución nutritiva requerida.
4. **Validación integral:** Realizar una validación más exhaustiva que considere diversos factores de influencia para asegurar la robustez del sistema en diferentes escenarios de operación.
5. **Mejora en la caja protectora:** Diseñar o seleccionar un case más apropiado que optimice el espacio y ofrezca una mayor protección a los componentes electrónicos, especialmente en el ambiente de cultivo hidropónico.
6. **Optimización del convertidor:** Sustituir el convertidor Buck por un transistor que permita un control de energía más compacto y eficiente, optimizando la conversión de energía en el sistema.

7. **Ajustar respuesta del sistema:** Para el caso de las pruebas de confiabilidad de EC se tiene un resultado aceptable, pero con oportunidad de mejora. Se debe considerar ajustar la dosis para así tener un mejor rendimiento.
8. **Bomba mezcladora en tanque de agua:** Se recomienda implementar una bomba mezcladora en el tanque de agua para así acelerar el proceso de homogenización en el agua.

## *Capítulo 8. Referencias bibliográficas*

- [1] Cl Lu, S. Grundy, G. Mohmed, K. Hardy, "Urban Agriculture and Vertical Farming," en *Encyclopedia of Sustainable Technologies (Segunda Edición)*, Elsevier, 2024. DOI: 10.1016/B978-0-323-90386-8.00139-X. [Online]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978032390386800139X>
- [2] H. Çilginoğlu, M. Avci, and Ü. Çilginoğlu, "The importance of vertical agriculture for sustainable gastronomy," *Journal of Humanities and Tourism Research*, vol. 12, no. 3, pp. 455–467, Karabuk University, Karabuk, Turkey, 2022, article no. 20220450739. DOI: 10.14230/johut1280.
- [3] M. Carolan, "It's about time: temporal and spatial fixes find vertical farms and local food in the shadow of COVID-19," *Journal of Peasant Studies*, vol. 49, no. 7, pp. 1446–1465, Routledge, Abingdon, UK, 2022, article no. 20220495408. DOI: 10.1080/03066150.2022.2082287
- [4] Vertigreens Urban Farm. (s.f.). Sobre Nosotros. Recuperado de <https://www.vertigreens.farm/Sobre-Nosotros>.
- [5] K. Resh, "Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower," CRC Press, 2012.
- [6] M. Lazarovitch, et al., "Root zone dynamics in systems with variable water and nutrient supplies," *Irrigation Science*, vol. 30, no. 2, pp. 1-12, 2015.
- [7] R. H. Hozayn, A. M. M. Goma, "Growth and yield of lettuce plants grown in floating system," *Journal of Applied Sciences Research*, vol. 8, no. 4, pp. 2015-2021, 2012.
- [8] S. Savvas, H. Passam, "Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals," Embryo Publications, 2010.
- [9] J. Thompson, "Wick Hydroponics: Principles and Applications," *Journal of Applied Hydroponics*, vol. 12, no. 4, pp. 203-209, 2017.

- [10] A. Adamczewska-Sowińska and M. Krygier, "Hydroponic lettuce growth in different types of growing media and nutrient solution," *Journal of Horticultural Research*, vol. 28, no. 2, pp. 31-36, 2018.
- [11] A. van Os, "Closed Soilless Growing Systems: A Sustainable Solution for Water and Nutrient Use," *Acta Horticulturae*, vol. 458, pp. 591-597, 2008.
- [12] L. Sonneveld and W. Voogt, *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*, Springer, 2009.
- [13] FAO, "Fertigation Guidelines: Irrigation and Fertilization in Modern Agriculture," FAO, Rome, 2012.
- [14] P. Kumar, et al., "Impact of light-emitting diodes (LEDs) on plant growth and development: A review," *International Journal of Agriculture and Biology*, vol. 20, no. 6, pp. 234-241, 2018.
- [15] M. Darko, et al., "LED horticultural lighting: Current technologies and applications," *Journal of Plant Growth Regulation*, vol. 38, no. 3, pp. 605-618, 2019.
- [16] S. Hogewoning, et al., "Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light," *Journal of Experimental Botany*, vol. 61, no. 11, pp. 3107-3117, 2010.
- [17] FAO, "Energy-Smart Food for People and Climate," FAO, Rome, 2011.
- [18] R. Stanghellini, et al., "Transpiration of greenhouse crops as affected by light, vapor pressure deficit and temperature," *Acta Horticulturae*, vol. 614, pp. 85-92, 2003.
- [19] T. Kozai, "Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: Case study with lettuce production," *Environmental Control in Biology*, vol. 50, no. 1, pp. 1-10, 2012.
- [20] J. W. Mastalerz, *Greenhouse Environment*, Wiley, 2000.
- [21] FAO, "Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable production in the South East European countries," FAO, Rome, 2017.

- [22] A. J. Both, "Greenhouse Ventilation," *International Journal of Ventilation*, vol. 6, no. 3, pp. 303-312, 2007.
- [23] J. Bunce, "Carbon dioxide concentration and photosynthesis in herbaceous crops," *Plant, Cell & Environment*, vol. 27, no. 8, pp. 967-975, 2004.
- [24] A. J. McPherson, et al., "Impact of CO<sub>2</sub> enrichment on crop yield and water use efficiency," *Journal of Environmental Quality*, vol. 36, no. 6, pp. 1539-1548, 2007.
- [25] A. Bar-Yosef, "Nutrient management in closed soilless culture systems," *Acta Horticulturae*, vol. 554, pp. 55-60, 2001.
- [26] FAO, "Water Quality for Agriculture," FAO, Rome, 2017.
- [27] R. H. Stoner, "Aeration in hydroponic systems: Maximizing oxygen for plant growth," *Journal of Plant Nutrition*, vol. 23, no. 4, pp. 561-568, 2000.
- [28] G. S. Venter, "Optimizing oxygen levels in nutrient solutions for hydroponic crops," *Hydroponic Solutions*, vol. 12, no. 2, pp. 115-120, 2015.
- [29] M. L. Gullino, et al., "Management of diseases in soilless culture systems," *Acta Horticulturae*, vol. 631, pp. 241-252, 2004.
- [30] R. Grange, "Sanitation and hygiene practices for hydroponic systems," *Journal of Plant Pathology*, vol. 34, no. 1, pp. 35-42, 2011.
- [31] J. P. Bentley, *Principles of Measurement Systems*, 4th ed., Harlow, UK: Pearson, 2005.
- [32] A. D. Helfrick and W. D. Cooper, *Modern Electronic Instrumentation and Measurement Techniques*, Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1990.
- [33] International Organization for Standardization, "ISO 9001: Quality management systems—Requirements," ISO, 2015.
- [34] S. Haykin and B. Van Veen, *Signals and Systems*, 2nd ed., Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2002.

- [35] J. S. Lim, *Two-Dimensional Signal and Image Processing*, Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1990.
- [36] G. H. Golub y C. F. Van Loan, *Matrix Computations*, 4th ed., Baltimore, MD, USA: Johns Hopkins University Press, 2013.
- [37] M. Garrett, "Elements of User Experience: User-Centered Design for the Web and Beyond," *IEEE Transactions on Professional Communication*, vol. 57, no. 4, pp. 78-82, Dec. 2014.
- [38] P. Polson, C. Lewis, J. Rieman, and C. Wharton, "Cognitive walkthroughs: A method for theory-based evaluation of user interfaces," *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 6, no. 3, pp. 303-334, 1992.
- [39] A. Cooper, R. Reimann, and D. Cronin, *About Face 3: The Essentials of Interaction Design*, 3rd ed., Indianapolis, IN, USA: Wiley, 2007.
- [40] International Organization for Standardization, "ISO 9241-210: Ergonomics of Human-System Interaction – Part 210: Human-Centered Design for Interactive Systems," ISO, 2010.
- [41] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi, "Internet of Things for Smart Cities," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 22-32, Feb. 2014.
- [42] A. Banks and R. Gupta, "MQTT Version 3.1.1," *OASIS Standard*, pp. 1-81, Dec. 2015.
- [43] S. Kent and K. Seo, "Security Architecture for the Internet Protocol," *RFC 4301*, Dec. 2005.
- [44] P. Ferguson and G. Huston, "What is a VPN?," *IEEE Internet Computing*, vol. 3, no. 1, pp. 92-95, Jan. 1999.
- [45] International Electrotechnical Commission, "IEC 60529: Degrees of Protection Provided by Enclosures (IP Code)," IEC, Geneva, 1989.

- [46] A. K. Debnath, S. H. Zhang, and M. Jamal Deen, "Environmental Protection and Reliability of IoT Devices with IP Ratings," *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 20, no. 3, pp. 456-463, Sept. 2020.
- [47] K. T. Ulrich and S. D. Eppinger, *Product Design and Development*, 6th ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2016.
- [48] Home Assistant, "Home Assistant Documentation," Available: <https://www.home-assistant.io/docs/>. Accessed: Nov. 7, 2024.
- [49] ESPHome, "ESPHome Documentation," Available: <https://esphome.io/>. Accessed: Nov. 7, 2024.
- [50] ZeroTier Inc., "Getting Started with ZeroTier," ZeroTier Documentation, Available: <https://docs.zerotier.com/start>. Accessed: Oct. 17, 2024.
- [51] P. H. Sydenham y R. Thorn, *Handbook of Measurement Science*, New York, NY, USA: Wiley, 1982.
- [52] R. A. Brealey, S. C. Myers, y F. Allen, *Principles of Corporate Finance*, 12th ed., Nueva York, NY, USA: McGraw-Hill, 2017.

## *Capítulo 9. Apéndices*

### 9.1 Generalidades de los Procesos en la empresa y Análisis

En el marco teórico se explica de manera general el proceso de cultivación hidropónico y sus diferentes fases. Ahora, en este Apéndice se pretende explicar las selecciones de la empresa para cada una de estas fases, y analizar el potencial de automatización que tienen en un futuro cercano. Cabe destacar que el proyecto abarca la medición y dosificación de EC y pH, pero el cliente requería de un diagnóstico de los procesos para considerar mejoras posteriores y futuros proyectos.

#### **9.1.1 Tipos de sistema hidropónico**

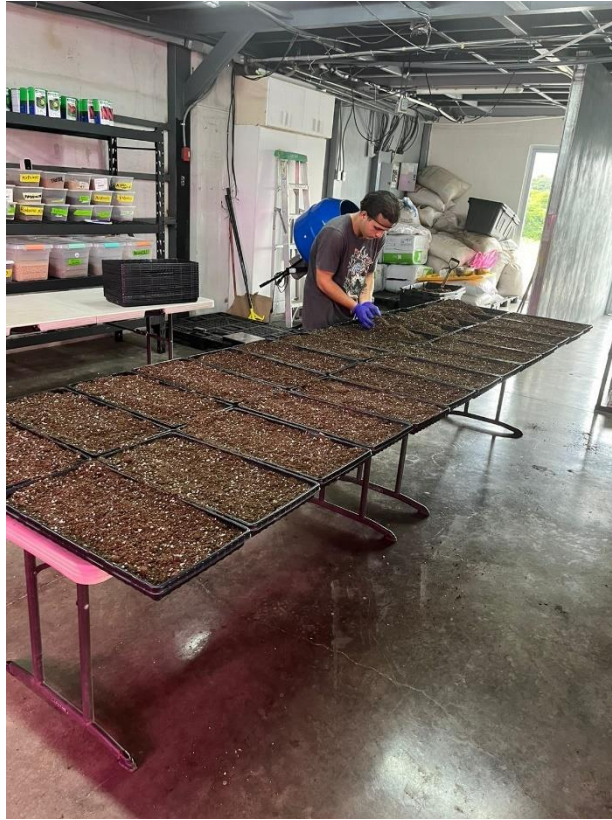
El sistema de hidroponía empleado corresponde a un híbrido entre la tecnología de Película Nutritiva (NFT), y el Sistema de Raíz Flotante (DWC). Los módulos o racks se obtuvieron por medio del proveedor Sananbio. Cabe destacar que estos sistemas se encargan tanto de la parte de irrigación, como de la iluminación a las plantas.



**Figura 9.1.1.** Módulo de Propagación de Plántulas Hidropónico Vertical para Interiores de Sananbio [Elaboración Propia]

### **9.1.2 Propagación y trasplante**

El proceso de propagación y trasplante en la empresa es el tradicional, en el cual se comienza con la germinación de las semillas en un medio de cultivo estéril, y una vez que se desarrollan las plántulas se trasladan de manera manual al sistema hidropónico. El sustrato utilizado corresponde a Pitmoss, el cual es un musgo especial proveniente de Alemania o Canadá que proporciona las condiciones ideales para la germinación. La duración del proceso de germinación y trasplante es de 3-4 días.



**Figura 9.1.2.** Proceso de propagación y trasplante [Elaboración Propia]

Con respecto a la automatización o mejora de este proceso se tiene que es una labor muy manual en un corto lapso, y luego de esto se dejan reposar las semillas varios días. Por esta razón el beneficio de automatizar un proceso como este es muy bajo tomando en consideración el tipo de labor manual desempeñada.

### **9.1.3 pH y EC**

Actualmente en Vertigreens tanto la medición como el control de las variables de pH y EC se realiza de manera completamente manual. El equipo empleado incluye medidores de mano, los cuales deben ser calibrados periódicamente para tener lecturas acertadas. Además de esto se tiene la dosificación que se hace vertiendo una cantidad de la solución indicada determinada por una estimación de los trabajadores tomando en consideración el

volumen de agua en el tanque. Se busca un pH de 5.8-6.0 idealmente, y una EC de entre 1 a 1.7.



**Figura 9.1.3.** Medidor de Mano de pH [Elaboración Propia]



**Figura 9.1.4.** Medidor de mano de EC [Elaboración Propia]

Como se menciona en la justificación del proyecto, este es un proceso con alto potencial de automatización y beneficios muy visibles una vez que esto sucede. El hecho que sea un proceso que sucede continuamente, y que involucra mediciones y dosificaciones que pueden ser llevadas a cabo por componentes como sensores y bombas hacen de esta la opción más obvia para automatizar en la empresa.

### **9.1.4 Iluminación**

La iluminación en el sistema de la empresa corresponde a artificial, más específicamente luces LED. Estas vienen integradas en el sistema de racks de hidroponía de Sananbio. El espectro de luz que se emite incluye las frecuencias electromagnéticas más beneficiosas para el crecimiento de las plantas, las cuales corresponden principalmente a la luz azul (400-500 nm) para el crecimiento vegetativo y la luz roja (600-700 nm) para la

floración y fructificación. Cabe destacar que se dan 10 horas de luz artificial al día, que es menor a lo recomendado. Esta es una decisión de la empresa por el precio de la electricidad.



**Figura 9.1.5.** Sistema de iluminación de los estantes Sananbio [Elaboración Propia]

La iluminación está totalmente automatizada en este momento, de manera que no se considera como un proceso postulante.

### **9.1.5 Temperatura y humedad**

La temperatura y humedad son variables que se tienen controladas en la empresa actualmente. Temperatura utilizada es de 24 grados, que está en el umbral superior de temperatura ideal. Esto se eligió por el costo de electricidad también. La temperatura se controla por medio de aire acondicionado. Luego de esto la humedad es del 70% para controlar este valor se utiliza el mismo aire acondicionado que seca ligeramente el aire, y de ser necesario se prenden deshumidificadores.

El beneficio de automatización de esta parte del proceso es muy bajo. Principalmente debido que hay aspectos parcialmente automatizados y al poco tiempo y esfuerzo que si se requiere del personal para controlar estas variables.

### 9.1.6 Ventilación y CO2

La ventilación es un aspecto que se trabaja actualmente y la concentración de CO2 no lo es. Se utilizan ventiladores de media potencia, los cuales dan resultados aceptables para la empresa. Esto no está medido ni regulado de ninguna manera.



**Figura 9.1.6.** Sistema de ventiladores de la empresa [Elaboración Propia]

Estos procesos tienen potencial para automatización debido a que la parte de CO2 no está considerada del todo, y la ventilación no está medida ni controlada. Sin embargo, no es factible debido a que el retorno a la inversión no sería significativo. Los especialistas de la empresa comentan que se podría considerar, pero anteriormente hay muchos otros aspectos más relevantes y con mejor retorno de inversión.

### **9.1.7 Recirculación y oxigenación del Agua**

La recirculación y oxigenación del agua son dos aspectos que se solucionan con el sistema de Sananbio mencionado previamente. Con este, el agua tarda aproximadamente 30 minutos en circular de manera completa el estante hidropónico. Este proceso también tiene el beneficio de que oxigena el agua.

Este proceso no está medido, pero si está dando los resultados deseados debido al diseño intencional de los estantes hidropónicos. Considerando esto, no es rentable hacer más modificaciones a este segmento de la cultivación hidropónica en un futuro cercano.

### **9.1.8 Cosecha**

La cosecha se hace de manera completamente manual. Este es un proceso que depende mucho del cultivo en cuestión. Si son microgreens se realiza cada 7-12 días aproximadamente, si son lechugas por ejemplo se realiza cada 47 días. La duración del proceso es de 2 horas aproximadamente para un módulo, se tienden a cosechar múltiples módulos en un día.

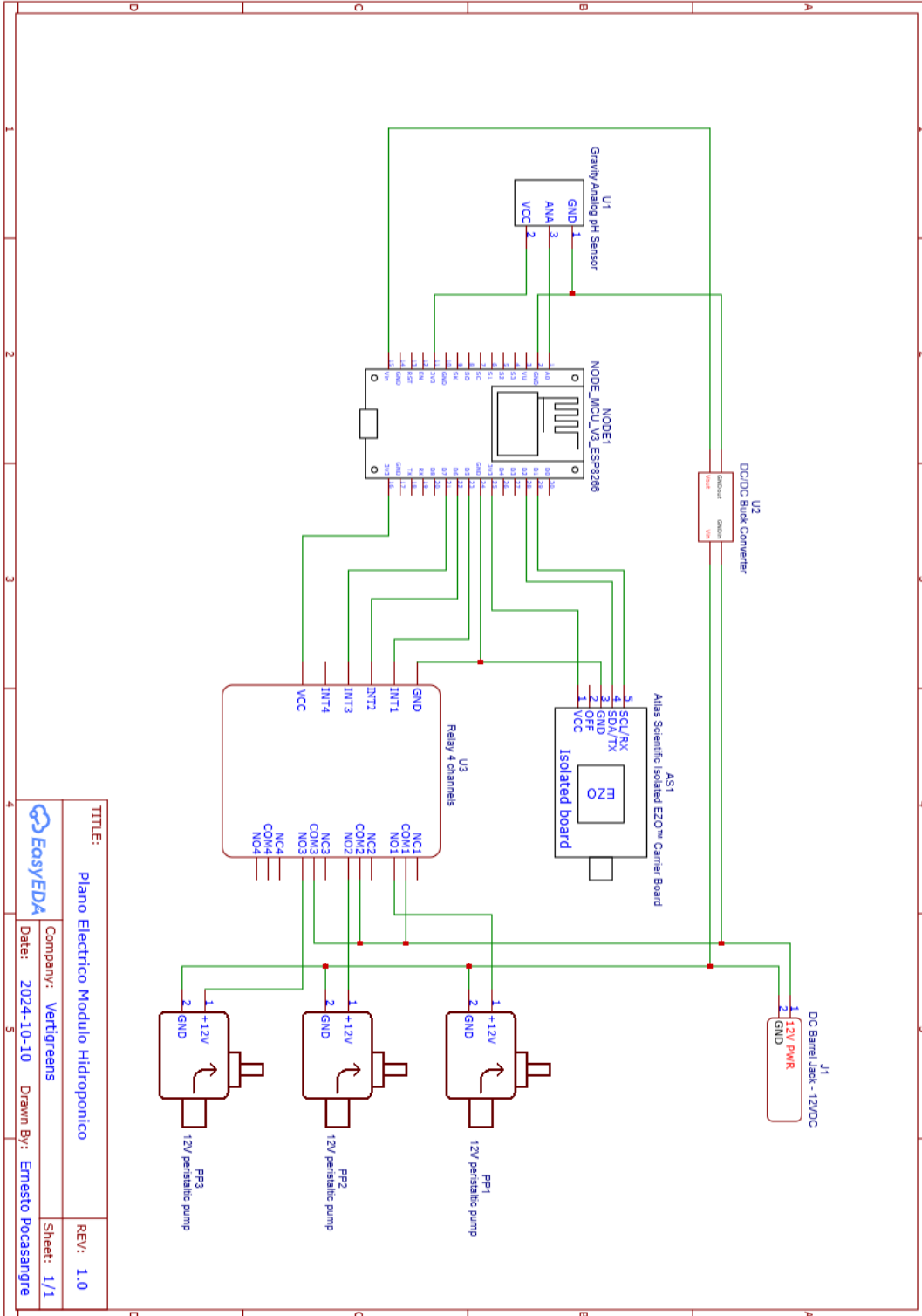
El potencial de automatización para este proceso es uno de los más interesantes también. Esto debido a que es un proceso crítico que tiene una duración larga. Los puntos en contra que se tienen son la complejidad de la labor que se realiza, para la cual la mano de obra de los trabajadores es de suma utilidad.

### **9.1.9 Limpieza**

La limpieza se realiza de manera completamente manual. Cada vez que se cosecha un módulo este debe ser limpiado, de manera que depende del cultivo, pero puede ser cada 7-12 días, o cada 47 días aproximadamente. El tiempo que se toma realizando este proceso es de 1 hora normalmente para un módulo.

La limpieza es otro proceso que podría tener potencial de automatización. Lo que sucede es que la dificultad de limpiar de manera correcta la indumentaria y los módulos de crecimiento hacen de este proceso una labor difícil de automatizar.

## 9.2 Plano Eléctrico del modulo



## 9.3 Código de EspHome

```
# Configuración de ESPhome
esphome:
  name: abajo # Nombre interno del dispositivo
  friendly_name: abajo # Nombre amigable para mostrar

# Configuración para el dispositivo ESP8266
esp8266:
  board: nodemcu2 # Modelo de la placa
  restore_from_flash: True # Restaura el estado desde la memoria flash al reiniciar

# Variables globales para la calibración del pH
globals:
  - id: cal4 # Calibración a pH 4
    type: float
    restore_value: yes # Guarda el valor al reiniciar
    initial_value: "680.1" # Valor inicial
  - id: cal7 # Calibración a pH 7
    type: float
    restore_value: yes
    initial_value: "518.4"

# Activación de registro de eventos (logging)
logger:

# level: verbose # Nivel de detalle de logs (opcional)

# API para la integración con Home Assistant
api:
  encryption:
    key: "FfJoAYQm1XW/M1NoyqySJ4L1OsfsfjgJSXxR34oiuC4=" # Clave de cifrado para la API
```

```
# OTA para actualizaciones inalámbricas
ota:
password: "4ef8202b2a2b53f4f5933b57ec19a385" # Contraseña de OTA

# Configuración de WiFi
wifi:
ssid: !secret wifi_ssid # SSID de WiFi (oculto en secretos)
password: !secret wifi_password # Contraseña de WiFi (oculto en secretos)

# Configuración de IP manual
manual_ip:
static_ip: 10.10.10.36 # IP estática del dispositivo
gateway: 10.10.10.1 # Puerta de enlace
subnet: 255.255.255.0 # Subred

# Hotspot de respaldo en caso de fallo de conexión WiFi
ap:
ssid: "Prueba2 Fallback Hotspot" # Nombre del hotspot
password: "Fz7zbslyxZdz" # Contraseña del hotspot

# Servidor web para acceso a la interfaz de ESPhome
web_server:
port: 80 # Puerto del servidor web

# Activación de portal cautivo (útil para configurar red)
captive_portal:

# Configuración de interfaz I2C
i2c:
sda: D2 # Pin de datos SDA
scl: D1 # Pin de reloj SCL
scan: true # Escaneo automático de dispositivos en el bus
id: bus_ezo
```

```
# Configuración de sensores
```

```
sensor:
```

```
# Sensor de pH utilizando el pin analógico (ADC)
```

```
- platform: adc
```

```
pin: A0 # Pin de entrada analógica
```

```
id: ph_adc # ID del sensor de pH
```

```
name: "pH adc" # Nombre para identificar
```

```
raw: True # Valor sin procesar
```

```
unit_of_measurement: "" # Sin unidad
```

```
update_interval: 1s # Intervalo de actualización cada segundo
```

```
filters:
```

```
- sliding_window_moving_average:
```

```
  window_size: 20 # Tamaño de la ventana de promedio
```

```
  send_every: 1 # Envía cada muestra
```

```
- median:
```

```
  window_size: 40 # Tamaño de la ventana de mediana
```

```
  send_every: 1 # Envía cada muestra
```

```
# Sensores de calibración pH
```

```
- platform: template
```

```
name: "Cal4" # Muestra el valor de cal4 (pH 4)
```

```
lambda: |-
```

```
  return id(cal4);
```

```
update_interval: 10s # Intervalo de actualización cada 10 segundos
```

```
- platform: template
```

```
name: "Cal7" # Muestra el valor de cal7 (pH 7)
```

```
lambda: |-
```

```
  return id(cal7);
```

```
update_interval: 10s
```

```
# Sensor de pH final usando los valores de calibración
```

```
- platform: template
```

```
name: pH Final # Nombre del sensor de pH calculado
```

```
lambda: |-  
    return 7.0 - 3.0 / (id(cal4)-id(cal7)) * (id(ph_adc).state - id(cal7));  
update_interval: 1min # Intervalo de actualización de 1 minuto  
unit_of_measurement: "pH" # Unidad de pH  
filters:  
    - sliding_window_moving_average:  
        window_size: 100 # Ventana de promedio  
        send_every: 1 # Envía cada muestra
```

```
# Sensor de conductividad eléctrica (EC) usando EZO  
- platform: ezo  
id: ec1_ezo # ID del sensor de EC  
name: "EC G1" # Nombre del sensor de EC  
address: 100 # Dirección del dispositivo EZO en el bus I2C  
accuracy_decimals: 2 # Precisión decimal  
filters:  
    - lambda: return x / 2 / 500; # Conversión a EC en ppm  
unit_of_measurement: "EC (ppm 500)"  
update_interval: 10s # Intervalo de actualización cada 10 segundos
```

```
# Sensor de texto para mostrar la dirección IP
```

```
text_sensor:  
- platform: wifi_info  
ip_address:  
name: ESP IP Address
```

```
# Configuración de salidas GPIO para control de bombas
```

```
output:  
- platform: gpio  
pin: D5 # Pin GPIO para bomba 1  
id: 'Pump1'  
inverted: true  
- platform: gpio  
pin: D6 # Pin GPIO para bomba 2
```

```
id: 'Pump2'  
inverted: true  
- platform: gpio  
pin: D7 # Pin GPIO para bomba 3  
id: 'Pump3'  
inverted: true
```

```
# Switches para controlar las bombas
```

```
switch:
```

```
- platform: output  
name: "Pump1" # Control para bomba 1  
output: Pump1  
- platform: output  
name: "Pump2" # Control para bomba 2  
output: Pump2  
- platform: output  
name: "Pump3" # Control para bomba 3  
output: Pump3
```

```
# Botones de calibración
```

```
button:
```

```
- platform: template  
name: "Calibrar4esp" # Botón para calibración en pH 4  
on_press:  
- lambda: |-  
    id(cal4) = id(ph_adc).state;  
- platform: template  
name: "Calibrar7esp" # Botón para calibración en pH 7  
on_press:  
- lambda: |-  
    id(cal7) = id(ph_adc).state;
```

```
# Botones de calibración EC
```

```
- platform: template
```

```

name: "Dry EC Calibration" # Calibración en seco EC
id: ec_calibrate_dry
on_press:
  then:
    - lambda: id(ec1_ezo).send_custom("cal,dry");
    - platform: template
name: "EC High Calibrate" # Calibración alta EC
id: ec_calibrate_high
on_press:
  then:
    - lambda: id(ec1_ezo).send_custom("cal,high,80000");
    - platform: template
name: "EC Low Calibrate" # Calibración baja EC
id: ec_calibrate_low
on_press:
  then:
    - lambda: id(ec1_ezo).send_custom("cal,low,12880");

# Botón para información del sensor EC
- platform: template
name: "Info"
id: ec_info
on_press:
  then:
    - lambda: return id(ec1_ezo).send_custom("i");

# Botón para reiniciar el dispositivo
- platform: restart
name: "esp restart"

```

## 9.4 Interfaz Gráfica Home Assistant

```
# Configuración de vistas en Home Assistant
```

```
views:
```

```
- title: Home # Título de la vista principal
```

```
  cards:
```

```
    - type: entities # Tarjeta de tipo entidades
```

```
      entities:
```

```
        - entity: sensor.modulo_g1_esp_ip_address # Muestra la IP del módulo G1
```

```
        - entity: sensor.modulo_g1_ph_final # Muestra el pH final del módulo G1
```

```
        - entity: sensor.modulo_g1_ec_g1 # Muestra la EC del módulo G1
```

```
      title: Módulo G1 # Título de la tarjeta
```

```
    - type: entities # Otra tarjeta de entidades para el módulo G6
```

```
      entities:
```

```
        - entity: sensor.modulo_g6_esp_ip_address # Muestra la IP del módulo G6
```

```
        - entity: sensor.modulo_g6_ph_final # Muestra el pH final del módulo G6
```

```
        - entity: sensor.modulo_g6_ec_g1 # Muestra la EC del módulo G6
```

```
      title: Módulo G6 # Título de la tarjeta
```

```
    - type: entities # Tarjeta de entidades para el módulo G7
```

```
      entities:
```

```
        - entity: sensor.modulo_g7_esp_ip_address # Muestra la IP del módulo G7
```

```
        - entity: sensor.modulo_g7_ph_final # Muestra el pH final del módulo G7
```

```
        - entity: sensor.modulo_g7_ec_g1 # Muestra la EC del módulo G7
```

```
      title: Módulo G7
```

```
    - type: entities # Tarjeta de entidades para el módulo G9
```

```
      entities:
```

```
        - entity: sensor.modulo_g9_esp_ip_address # Muestra la IP del módulo G9
```

```
        - entity: sensor.modulo_g9_ph_final # Muestra el pH final del módulo G9
```

```
        - entity: sensor.modulo_g9_ec_g1 # Muestra la EC del módulo G9
```

```
      title: Módulo G9
```

```
    - type: history-graph # Gráfico histórico de pH
```

```
      entities:
```

```

- entity: sensor.modulo_g6_ph_final # pH del módulo G6
- entity: sensor.modulo_g9_ph_final # pH del módulo G9
title: pH # Título del gráfico

- type: history-graph # Gráfico histórico de EC
entities:
- entity: sensor.modulo_g6_ec_g1 # EC del módulo G6
- entity: sensor.modulo_g9_ec_g1 # EC del módulo G9
title: EC # Título del gráfico

- type: entities # Tarjeta para mostrar la IP local del sistema
entities:
- sensor.local_ip # Dirección IP del dispositivo local

- title: PH Debug 2 # Vista para depuración del pH
path: ph-debug-2 # URL de la vista
badges: []
cards:
- chart_type: line # Gráfico de línea
period: hour # Periodo de muestreo por hora
type: statistics-graph # Tipo de gráfico de estadísticas
entities:
- sensor.modulo_g9_ph_adc # Sensor ADC de pH del módulo G9
stat_types:
- mean # Promedio
- min # Valor mínimo
- max # Valor máximo
title: G9 # Título del gráfico

- chart_type: line # Gráfico de línea para varios sensores ADC
period: 5minute # Periodo de muestreo cada 5 minutos
type: statistics-graph
entities:
- sensor.modulo_g1_ph_adc # Sensor ADC de pH del módulo G1

```

```

- sensor.modulo_g6_ph_adc # Sensor ADC de pH del módulo G6
- sensor.modulo_g7_ph_adc # Sensor ADC de pH del módulo G7
- sensor.modulo_g9_ph_adc # Sensor ADC de pH del módulo G9
stat_types:
- mean # Promedio
days_to_show: 1 # Días a mostrar en el gráfico

- title: Home 2 # Segunda vista de Home
path: home-2 # URL de la vista
badges: []
cards:
- type: gauge # Indicador de pH en forma de medidor
entity: sensor.modulo_g9_ph_final # Sensor de pH final del módulo G9
min: 0 # Mínimo del medidor
max: 14 # Máximo del medidor
needle: false # Sin aguja en el medidor

- type: history-graph # Gráfico histórico del pH
entities:
- entity: sensor.modulo_g9_ph_final # Sensor de pH del módulo G9
title: pH # Título del gráfico
hours_to_show: 12 # Horas a mostrar en el gráfico

- type: gauge # Indicador de EC en forma de medidor
entity: sensor.modulo_g9_ec_g1 # Sensor de EC del módulo G9
min: 0 # Mínimo del medidor
max: 2.5 # Máximo del medidor

- type: history-graph # Gráfico histórico de EC
entities:
- entity: sensor.modulo_g9_ec_g1 # Sensor de EC del módulo G9
title: EC # Título del gráfico
hours_to_show: 12 # Horas a mostrar en el gráfico

```

- title: **Prueba 25/10** # Vista para pruebas del 25 de octubre

path: **prueba-25-10** # URL de la vista

badges: []

cards:

- type: **entities** # Tarjeta de entidades para el módulo G6

entities:

- entity: **sensor.modulo\_g6\_ph\_final** # Sensor de pH final del módulo G6

- entity: **button.medio\_esp\_restart** # Botón para reiniciar el módulo G6

title: **Medio** # Título de la tarjeta

- type: **entities** # Tarjeta de entidades para el módulo G9

entities:

- entity: **sensor.modulo\_g9\_ph\_final** # Sensor de pH final del módulo G9

- entity: **sensor.modulo\_g9\_ec\_g1** # Sensor de EC del módulo G9

- entity: **button.abajo\_esp\_restart** # Botón para reiniciar el módulo G9

title: **Abajo** # Título de la tarjeta

- type: **history-graph** # Gráfico histórico de pH entre G6 y G9

entities:

- entity: **sensor.modulo\_g9\_ph\_final** # Sensor de pH final del módulo G9

- entity: **sensor.modulo\_g6\_ph\_final** # Sensor de pH final del módulo G6

hours\_to\_show: **96** # Muestra las últimas 96 horas

- type: **history-graph** # Gráfico histórico de automatizaciones y bombas de control de pH

entities:

- entity: **automation.control\_ph\_alto** # Automatización para control de pH alto

- entity: **automation.control\_ph\_bajo** # Automatización para control de pH bajo

- entity: **switch.modulo\_g9\_pump2** # Interruptor de bomba 2 del módulo G9

- entity: **switch.modulo\_g9\_pump3** # Interruptor de bomba 3 del módulo G9

hours\_to\_show: **8** # Muestra las últimas 8 horas

- type: **entities** # Tarjeta para controlar los parámetros de entrada

entities:

- entity: **input\_number.ph\_ideal** # Ajuste de pH ideal

```
- entity: input_number.ec_ideal # Ajuste de EC ideal
- entity: input_number.intervalo_de_dosificacion # Ajuste del intervalo de dosificación
title: Entradas # Título de la tarjeta
```

## 9.5 Código de Automatizaciones Home Assistant

### 9.5.1 Control pH Alto

```
alias: Control pH Alto # Nombre de la automatización
```

```
description: "" # Descripción opcional
```

```
# Definición de los disparadores de la automatización
```

```
trigger:
```

```
- platform: time_pattern # Usa un patrón de tiempo para activar la automatización
```

```
minutes: /30 # Se ejecuta cada 30 minutos
```

```
# Condiciones para que la automatización se active
```

```
condition:
```

```
- condition: state # Verifica el estado del interruptor de la bomba
```

```
entity_id: switch.modulo_g9_pump2 # Identifica la bomba asociada al módulo G9
```

```
state: "off" # Asegura que la bomba esté apagada
```

```
for:
```

```
hours: 0 # La bomba debe haber estado apagada al menos 40 minutos
```

```
minutes: 40
```

```
seconds: 0
```

```
enabled: false # Desactiva temporalmente esta condición
```

```
- condition: numeric_state # Verifica el nivel de pH
```

```
entity_id: sensor.modulo_g9_ph_final # Sensor de pH del módulo G9
```

```
above: 6 # Activa la automatización si el pH está por encima de 6
```

```
# Acciones a ejecutar si se cumplen los disparadores y condiciones
```

```
action:
```

```
- service: switch.turn_on # Enciende la bomba 2 del módulo G9
```

```
  data: {}
```

```
  target:
```

```
    entity_id: switch.modulo_g9_pump2
```

```
- delay: # Espera 3 segundos con la bomba encendida
```

```
  hours: 0
```

```
  minutes: 0
```

```
  seconds: 3
```

```
  milliseconds: 0
```

```
- service: switch.turn_off # Apaga la bomba 2 después del retardo
```

```
  data: {}
```

```
  target:
```

```
    entity_id: switch.modulo_g9_pump2
```

```
# Modo de ejecución de la automatización
```

```
mode: single # Evita que se ejecute de nuevo si ya está en ejecución
```

### 9.5.2 pH Bajo

```
alias: Control pH Bajo # Nombre de la automatización
```

```
description: "" # Descripción opcional
```

```
# Definición del disparador de la automatización
```

```
trigger:
```

```
- platform: time_pattern # Usa un patrón de tiempo como disparador
```

```
  minutes: /30 # La automatización se ejecuta cada 30 minutos
```

```
# Condiciones para que la automatización se active
```

```
condition:
```

```
- condition: state # Verifica el estado de la bomba
```

```
  state: "off" # La bomba debe estar apagada
```

```
  for:
```

```
    hours: 0 # La bomba debe haber estado apagada por al menos 40 minutos
```

```

minutes: 40
seconds: 0
entity_id: switch.modulo_g9_pump3 # Bomba 3 asociada al módulo G9

- condition: numeric_state # Condición de nivel de pH
entity_id: sensor.modulo_g9_ph_final # Sensor de pH del módulo G9
below: 5.6 # Activa la automatización si el pH está por debajo de 5.6

# Acciones a ejecutar si se cumplen los disparadores y condiciones
action:
- service: switch.turn_on # Enciende la bomba 3 del módulo G9
data: {}
target:
entity_id: switch.modulo_g9_pump3
- delay: # Mantiene la bomba encendida durante 3 segundos
hours: 0
minutes: 0
seconds: 3
milliseconds: 0
- service: switch.turn_off # Apaga la bomba 3 después del retardo
data: {}
target:
entity_id: switch.modulo_g9_pump3

# Modo de ejecución de la automatización
mode: single # Evita ejecutar la automatización de nuevo si ya está en ejecución

```

### 9.5.3 Control EC Bajo

```

alias: Control EC Bajo # Nombre de la automatización
description: "" # Descripción opcional

# Disparador de la automatización
trigger:

```

```

- platform: time_pattern # Usa un patrón de tiempo como disparador
  minutes: /30 # Se ejecuta cada 30 minutos

# Condiciones para que la automatización se active
condition:
- condition: state # Verifica el estado de la bomba
  entity_id: switch.modulo_g9_pump1 # Bomba 1 asociada al módulo G9
  state: "off" # La bomba debe estar apagada
for:
  hours: 0 # La bomba debe haber estado apagada por al menos 40 minutos
  minutes: 40
  seconds: 0

- condition: numeric_state # Verifica el nivel de EC
  entity_id: sensor.modulo_g9_ec_g1 # Sensor de EC del módulo G9
  below: 1 # Activa la automatización si el EC está por debajo de 1

# Acciones a ejecutar si se cumplen los disparadores y condiciones
action:
- service: switch.turn_on # Enciende la bomba 1 del módulo G9
  data: {}
  target:
    entity_id: switch.modulo_g9_pump1
- delay: # Mantiene la bomba encendida durante 10 segundos
  hours: 0
  minutes: 0
  seconds: 10
  milliseconds: 0
- service: switch.turn_off # Apaga la bomba 1 después del retardo
  data: {}
  target:
    entity_id: switch.modulo_g9_pump1

# Modo de ejecución de la automatización

```

mode: **single** # Evita que la automatización se ejecute de nuevo si ya está en curso

## 9.5.4 Notificación de Atención

alias: **Notificación de Atención** # Nombre de la automatización

description: "" # Descripción opcional

# Definición de los disparadores de la automatización

trigger:

- platform: **numeric\_state** # Disparador basado en el estado numérico

entity\_id:

- **sensor.modulo\_g9\_ph\_final** # Sensor de pH final del módulo G9

for:

hours: **2** # Activa si el pH está fuera de rango por más de 2 horas

minutes: **0**

seconds: **0**

above: **6.2** # Activa si el pH está por encima de 6.2

- platform: **numeric\_state**

entity\_id:

- **sensor.modulo\_g9\_ph\_final**

for:

hours: **2** # Activa si el pH está fuera de rango por más de 2 horas

minutes: **0**

seconds: **0**

below: **5.4** # Activa si el pH está por debajo de 5.4

- platform: **numeric\_state**

entity\_id:

- **sensor.modulo\_g9\_ec\_g1** # Sensor de EC del módulo G9

for:

hours: **2** # Activa si el EC está fuera de rango por más de 2 horas

minutes: **0**

seconds: **0**

```

below: 1 # Activa si el EC está por debajo de 1

# No hay condiciones adicionales
condition: []

# Acción a realizar si se cumplen los disparadores
action:
- service: notify.notify # Envía una notificación
  metadata: {}
  data:
    title: Atención Requerida Modulo G9 # Título de la notificación
    message: >- # Mensaje de la notificación
      Los valores de pH o EC del modulo se encuentran fuera de rango por más
      de 2h.

# Modo de ejecución de la automatización
mode: single # Evita ejecutar de nuevo la automatización si ya está en curso

```

## 9.6. Tablas de resultados para las pruebas de validación

### 9.6.1 Datos sin procesar prueba 1: Exactitud en la dosificación de líquidos

pH Up (ml)	EC Up (ml)	pH Down (ml)
4.8	4.8	4.9
5.2	5.1	4.9
4.8	5.0	4.8
5.0	5.1	4.9
4.9	5.2	5.0
5.2	5.1	4.8
5.1	5.0	5.1
5.0	4.9	5.2

4.9	5.1	4.8
5.2	5.0	4.8
4.9	5.1	5.0
5.1	5.0	4.9
5.0	5.2	5.1
4.9	5.0	4.8
5.0	5.1	5.0
4.9	4.9	5.0
5.2	5.0	4.8
5.0	5.2	5.0
4.8	4.9	4.8
5.2	5.2	5.0
4.9	5.0	4.9
5.0	5.1	5.0
5.2	5.0	5.1
5.1	5.0	5.0
4.8	4.8	5.0
5.0	5.0	4.8
5.1	5.1	4.9
4.9	4.8	4.9
4.9	5.0	5.0
5.0	5.0	5.1
5.1	5.1	5.1
5.0	5.1	4.8
5.2	5.0	5.0
5.0	5.0	4.9
4.8	5.2	4.8
4.9	5.1	5.1
4.9	4.9	4.8
5.1	5.1	4.9
4.8	4.9	4.7
5.0	4.9	4.9
5.2	5.1	4.9

5.0	5.1	5.0
4.9	5.2	4.9
5.1	5.0	5.0
4.8	5.1	5.1
5.0	5.2	4.8
4.8	4.9	4.9
4.9	5.0	4.9
5.2	4.9	5.0
4.9	5.1	4.9
4.9	4.9	5.0
5.1	5.1	4.9
5.1	4.9	5.1
5.0	5.2	4.9
5.1	5.1	5.0
5.0	5.2	5.2
4.9	4.8	5.1
4.9	5.1	4.9
5.0	4.9	5.1
5.1	5.1	4.9
5.1	4.9	5.1
4.9	5.0	5.1
5.0	4.8	4.9
5.1	5.1	5.0
4.9	5.1	4.8
5.1	4.8	4.9
5.0	5.0	5.0
5.1	5.1	4.9

**9.6.2 Datos sin procesar prueba 2: Exactitud en la medición del pH**

Medición Sensor (pH)	Medición Manual (pH)
5.8	5.8

5.9	6.0
5.8	5.8
5.8	5.7
5.7	5.7
5.7	5.7
5.7	5.7
5.9	5.9
5.8	5.8
5.8	5.8
5.7	5.7
5.9	5.9
5.9	5.9
5.7	5.7
5.7	5.7
5.7	5.7
5.8	5.8
5.8	5.8
5.8	5.9
5.8	5.8
5.8	5.8
5.7	5.8
5.8	5.8
5.8	5.9
5.8	5.8
5.9	5.9
5.7	5.7
5.8	5.8
5.8	5.8
5.7	5.7
5.8	5.8
5.7	5.7
5.7	5.7
5.9	5.9

5.9	5.9
5.9	5.9
5.8	5.8
5.7	5.7
5.8	5.8
5.8	5.8
5.7	5.7
5.8	5.9
5.7	5.7
5.9	5.9
5.8	5.8
5.8	5.8
5.8	5.8
5.8	5.8
5.8	5.8
5.7	5.7
5.9	5.9
5.9	5.8
5.9	5.9
5.9	5.9
5.8	5.7
5.9	5.9
5.7	5.6
5.7	5.7
5.7	5.7
5.8	5.8
5.8	5.8
5.8	5.8
5.9	5.9
5.8	5.8
5.8	5.8
5.8	5.8
5.7	5.7

5.9	5.9
-----	-----

**9.6.3 Datos sin procesar prueba 3: Exactitud en la medición del EC**

Medición Sensor (mS/cm)	Medición Manual (mS/cm)
1.03	1.04
1.03	1.04
1.00	1.00
0.99	0.98
0.99	0.99
0.99	0.97
0.99	0.99
1.02	1.02
0.99	0.98
1.00	1.00
1.02	1.02
0.99	1.01
1.02	1.03
1.00	1.00
0.99	0.99
1.02	1.02
1.02	1.04
1.03	1.03
1.02	1.01
1.02	1.01
1.00	1.00
1.00	1.00
1.02	1.02
1.02	1.03
1.03	1.05
1.01	1.01
1.00	1.01

1.02	1.02
1.00	1.00
1.03	1.03
1.02	1.03
1.01	1.03
1.02	1.02
1.02	1.02
0.99	1.00
1.03	1.03
1.01	0.99
1.02	1.02
1.00	1.00
1.03	1.03
1.01	1.00
0.99	1.00
1.03	1.01
0.99	0.98
1.00	1.00
1.03	1.03
1.03	1.05
1.01	1.00
1.02	1.02
1.01	1.03
1.00	1.00
1.00	1.00
1.02	1.02
1.02	1.03
1.02	1.02
1.02	1.00
0.99	1.00
1.01	1.01
0.99	1.00
1.01	1.02

1.01	1.01
1.03	1.03
1.00	1.00
0.99	0.99
1.00	1.00
1.02	1.04
1.01	1.01
0.99	1.00

***9.6.4 Datos sin procesar prueba 4: Confiabilidad para mantener pH***

Medición del Sensor (pH)
5.8
5.7
5.7
5.6
5.5
5.5
5.6
5.6
5.7
5.8
5.7
5.8
5.8
5.9
6.0
6.1
6.0
6.1

6.3
6.2
6.2
5.9
6.1
6.0
5.9
5.9
5.8
5.8
5.8
5.7
5.7
5.6
5.6
5.5
5.4
5.3
5.4
5.5
5.6
5.7
5.7
5.7
5.8
5.8
5.9
5.9
6.0
5.9
6.0
6.0
6.1

6.1
6.1
6.2
6.1
6.0
6.0
6.0
6.0
5.9
5.8
5.9
5.7
5.8
5.7
5.8
5.8
5.8

***9.6.5 Datos sin procesar prueba 5: Confiabilidad para mantener EC***

Medición del sensor (mS/cm)
1.05
1.02
1.02
1.04
1.01
1.00
1.00
0.99
0.98

1.00
1.01
1.05
1.08
1.10
1.10
1.11
1.09
1.10
1.10
1.09
1.10
1.09
1.09
1.09
1.08
1.09
1.08
1.08
1.07
1.06
1.06
1.05
1.05
1.05
1.04
1.04
1.03
1.04
1.02
1.00
0.98
1.00

0.98
0.97
0.99
1.00
1.01
1.05
1.03
1.03
1.06
1.08
1.08
1.09
1.08
1.07
1.07
1.07
1.06
1.05
1.04
1.05
1.04
1.03
1.03
1.02
1.02
1.02

## 9.7 Preguntas planteadas en la entrevista

¿Qué tan importante es para usted que la interfaz del sistema sea fácil de usar y entender?

¿Prefiere una interfaz digital, o algo más simple, como botones físicos?

¿Qué tan importante es para usted poder acceder al sistema de manera remota, por ejemplo, a través de su teléfono o computadora?

¿Le gustaría recibir notificaciones en su dispositivo móvil cuando ocurra algún evento inusual en el sistema?

¿Qué tan crucial es para usted que la máquina sea pequeña y fácil de mover dentro de su instalación?

¿Cuánto espacio tiene disponible para instalar el sistema?

En caso de que el sistema necesite mantenimiento, ¿qué tan importante es para usted que los repuestos sean fácilmente accesibles y económicos?

¿Le gustaría poder realizar el mantenimiento básico usted mismo o preferiría contar con asistencia técnica especializada?

¿Desea que el sistema sea compatible con otros dispositivos en su red actual, como sistemas de monitoreo ambiental, cámaras, o sistemas de riego?

¿Es importante que el sistema se integre con su sistema de automatización actual, como Apple Home o similar?

¿Le gustaría que el sistema fuera escalable, es decir, que pueda agregar más módulos, sensores o funciones en el futuro?

¿Qué tan importante es que el sistema permita actualizaciones de software de manera sencilla?

¿Le gustaría tener la capacidad de controlar manualmente algunas funciones del sistema, como ajustar las dosis de pH o EC?

¿Cuáles son sus expectativas sobre la seguridad del sistema? ¿Desea que el acceso esté protegido mediante contraseñas u otros mecanismos de seguridad?

¿Le preocupa la protección contra fallos o errores del sistema? ¿Qué tan importante es para usted tener un respaldo de los datos?

¿Cuál es su presupuesto aproximado para la adquisición e implementación de este sistema?

¿Prefiere una solución más económica, pero con menos funciones, o está dispuesto a invertir más en un sistema con mayor automatización y precisión?

¿Le gustaría que el sistema tenga un bajo consumo energético o un diseño que minimice el impacto ambiental?

¿Cuál sería el conocimiento técnico de los operadores de la máquina?

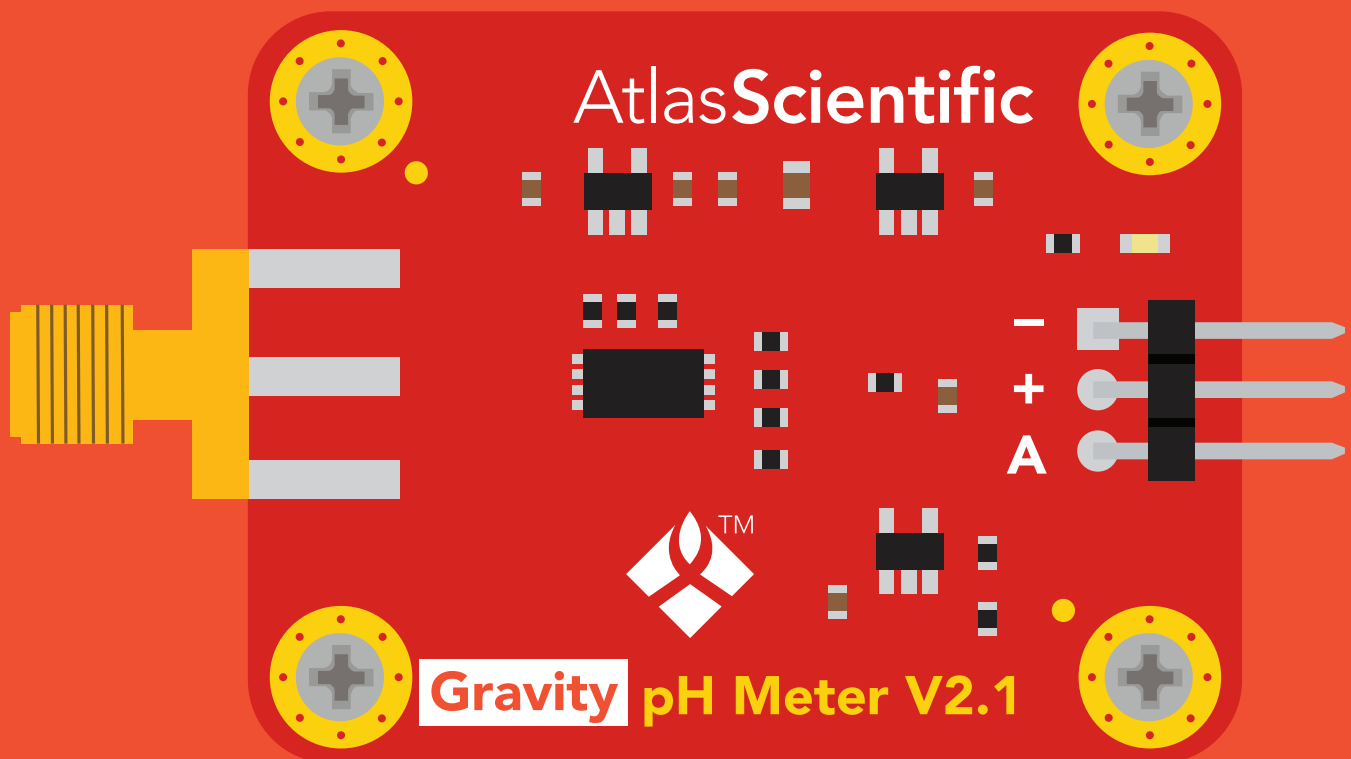
¿Cuáles son las condiciones atmosféricas del local?

¿Cuál es la conectividad a internet que disponen en el lugar?

## *10. Anexos*

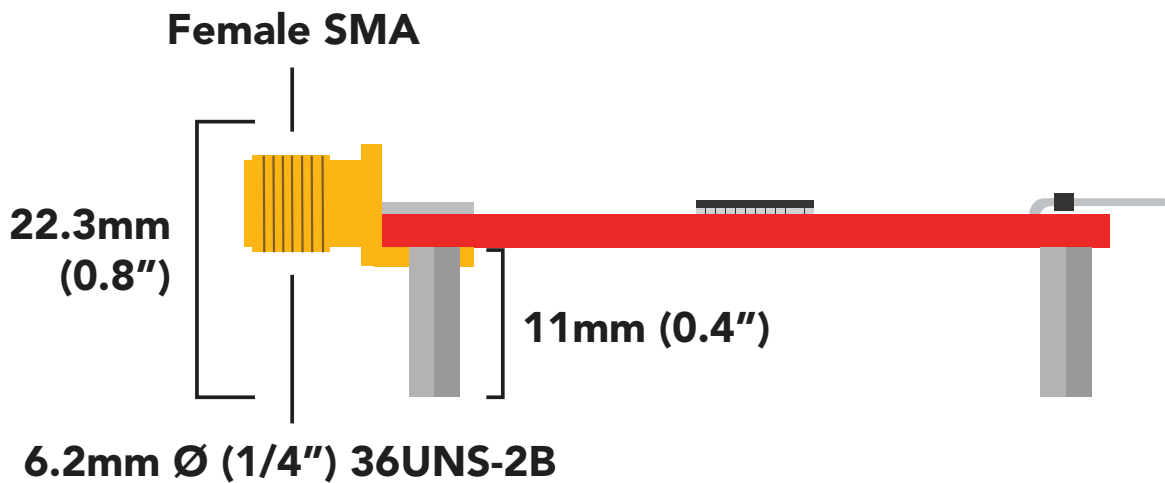
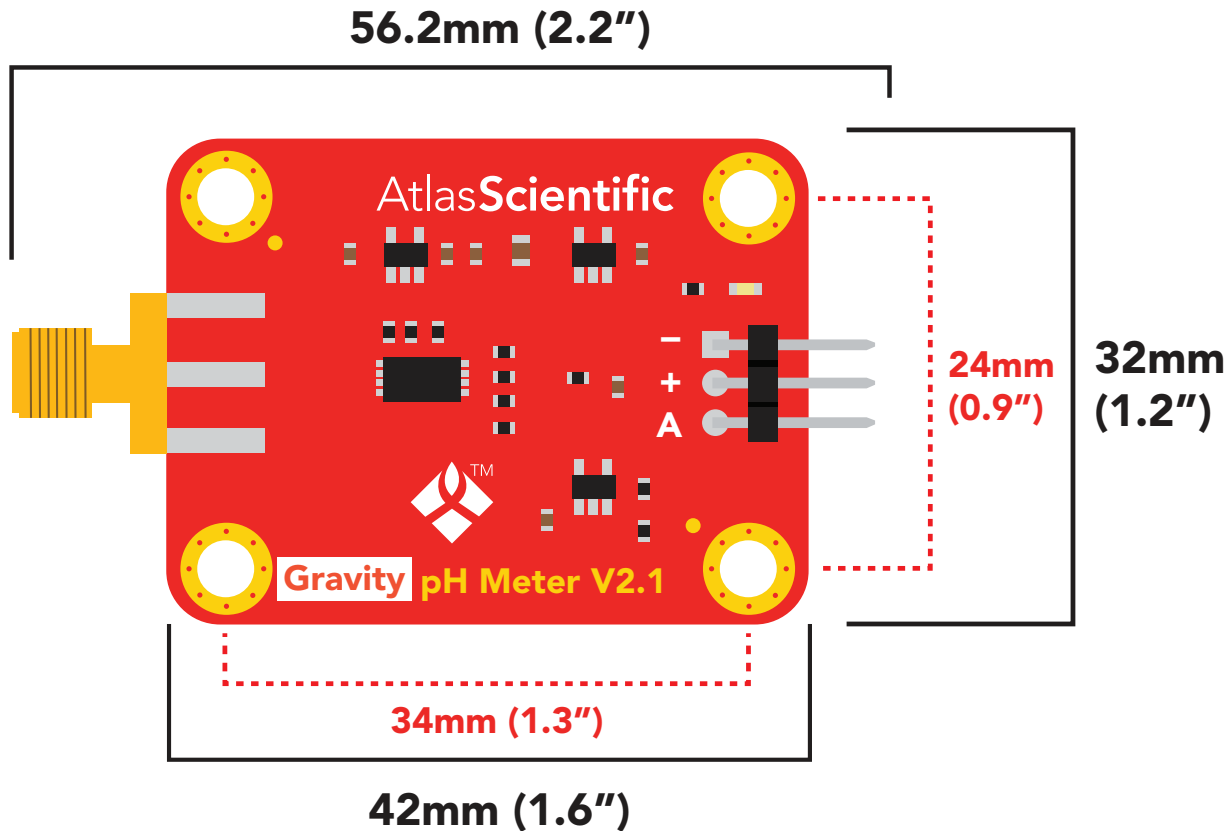
# Gravity<sup>TM</sup>

## Analog pH Sensor / Meter



**PATENT PROTECTED**

# Gravity dimensions



## Power consumption

**5V = 3mA**  
**3.3V = 3mA**

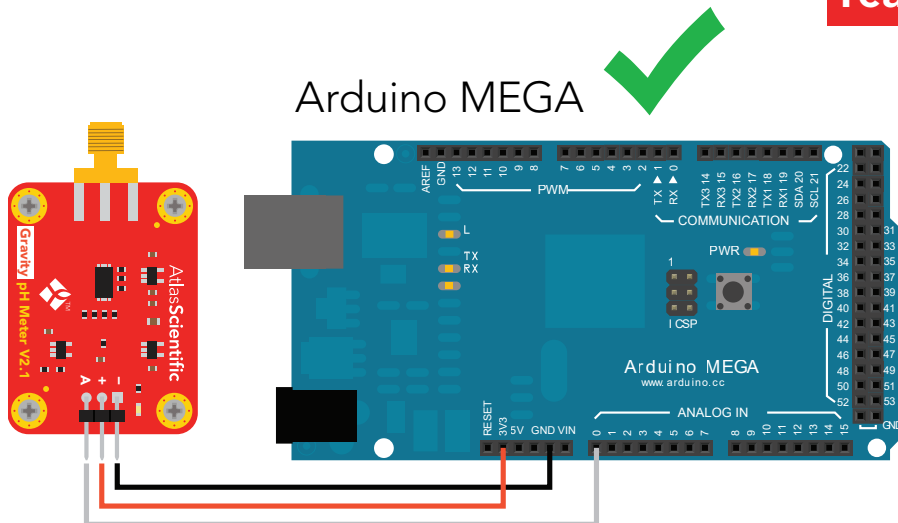
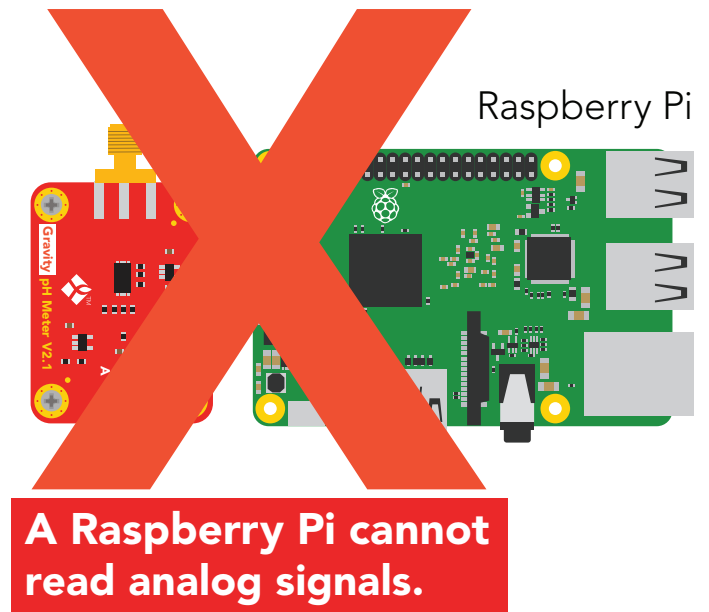
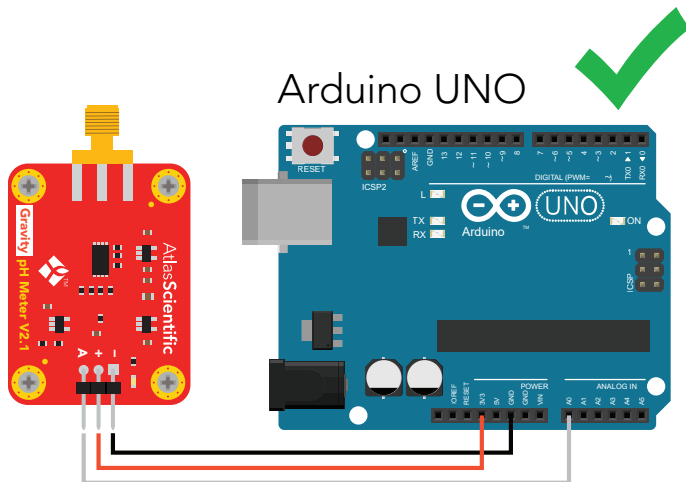
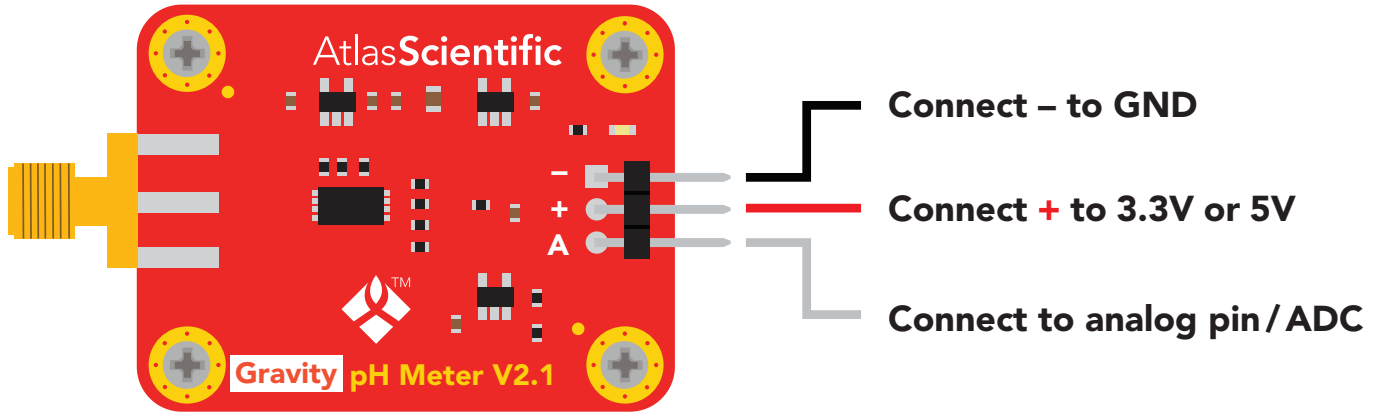
## Absolute max ratings

Parameter	MIN	TYP	MAX
Storage temperature	-65 °C		125 °C
Operational temperature	-40 °C	25 °C	50 °C
VCC	3.3V	5V	5.5V

The Atlas Scientific Gravity™ Analog pH Sensor / Meter is a low-cost solution specifically designed for

- **Students / education**
- **Proof of concept designs**
- **Moderate accuracy applications**

## Connection pins

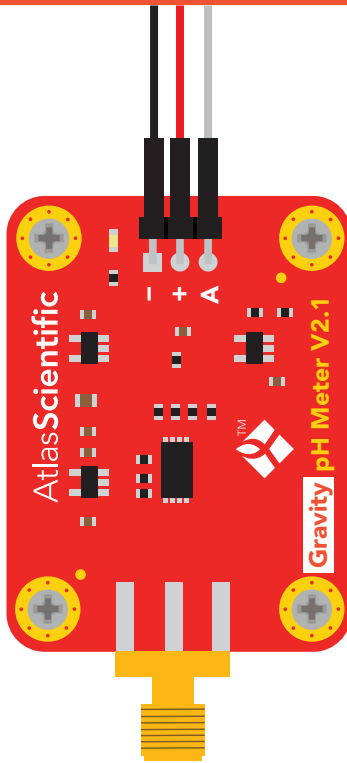


# Converting the analog signal into pH

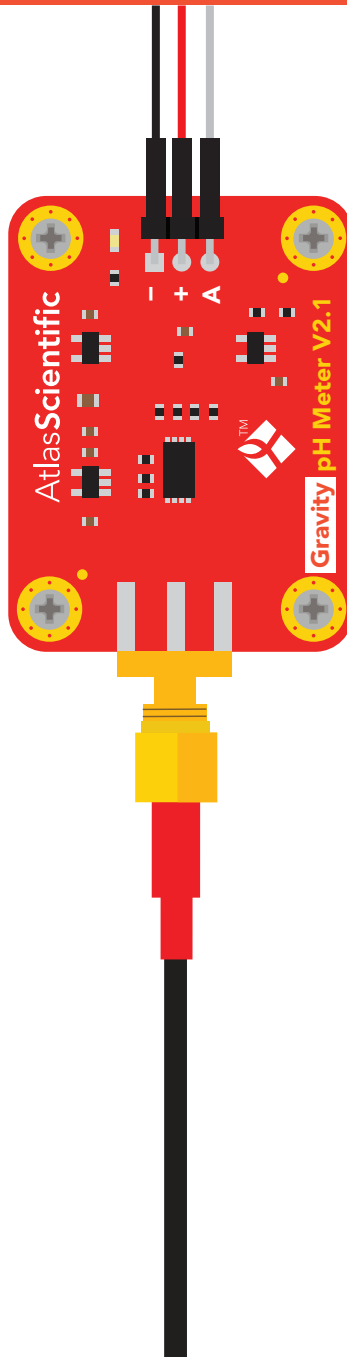
The Atlas Scientific Gravity™ Analog pH Sensor / Meter will output a voltage from 3.00V to 0.265V.

## Equation to convert voltage to pH

$$pH = (-5.6548 * voltage) + 15.509$$



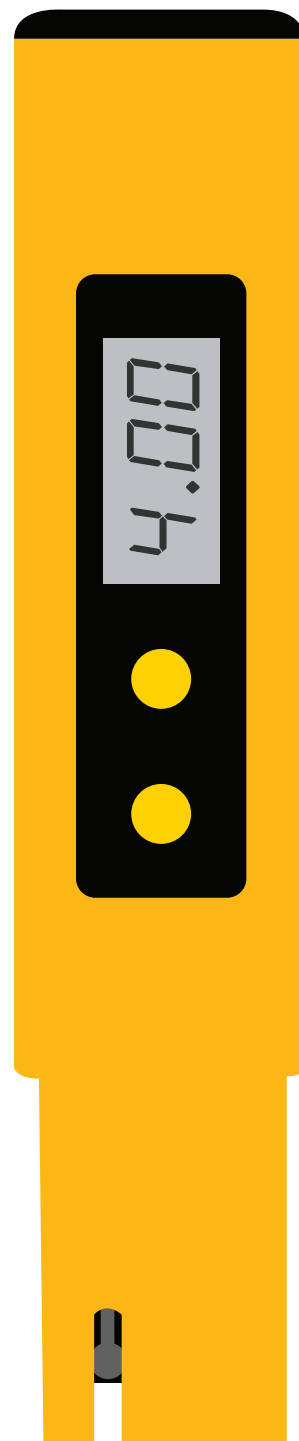
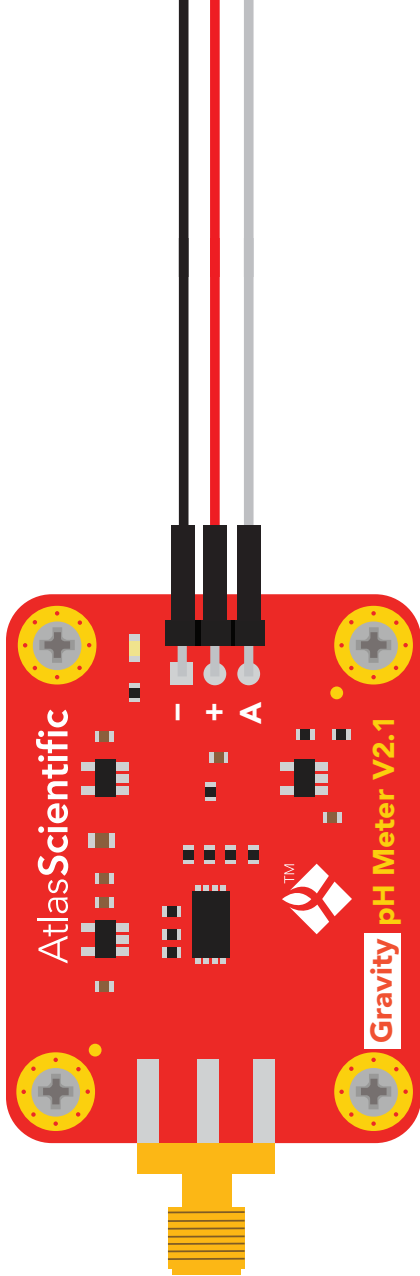
No probe = Unpredictable



Tolerance  $\pm .015V$

pH Volts

0	2.745
1	2.570
2	2.390
3	2.210
4	2.030
5	1.855
6	1.680
7	1.500
8	1.330
9	1.155
10	0.975
11	0.800
12	0.620
13	0.445
14	0.265



**Accuracy**

+/- 0.2

**Life expectancy**

~10 years

**Accuracy**

+/- 0.2

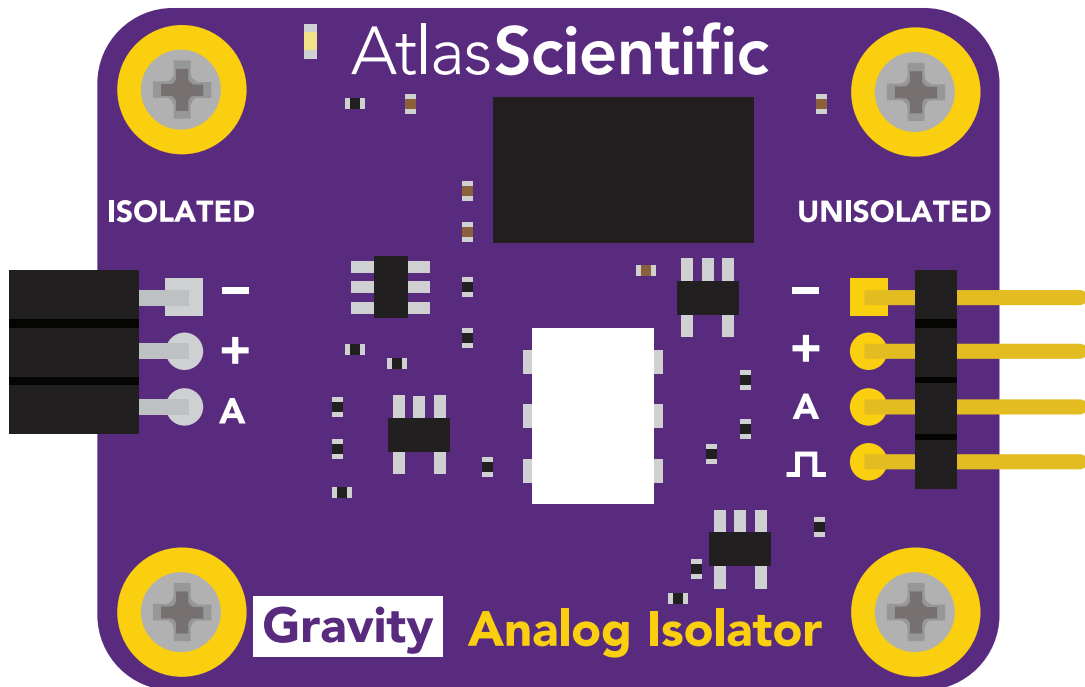
**Life expectancy**

~6 – 10 months

# Electrical isolation

The Atlas Scientific Gravity™ Analog pH Sensor / Meter is a very sensitive device and is susceptible to electrical interference from external sources. This interference is caused by micro-voltages entering the water from unnatural sources such as pumps, solenoid valves, or other probes / sensors. When electrical interference is affecting the pH readings, it is common to see rapidly fluctuating readings or readings that are consistently off. To verify that electrical noise is causing inaccurate readings, place the pH probe in a cup of water by itself. The readings should stabilize quickly, confirming that electrical noise was the issue.

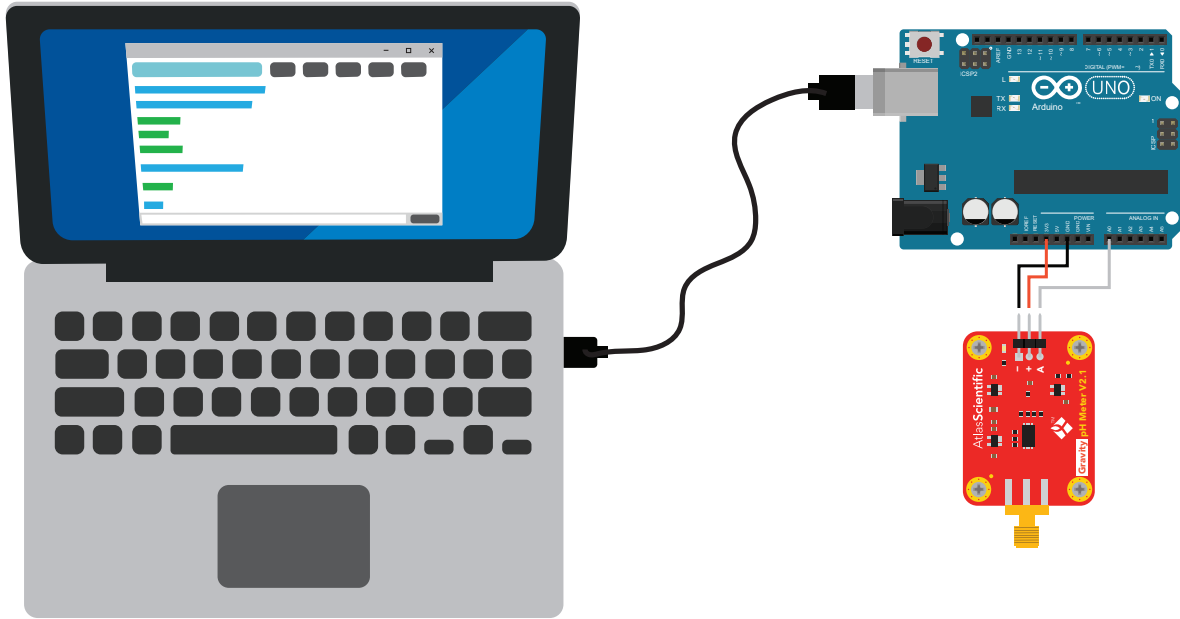
To stop electrical interference from affecting the readings, Atlas Scientific **strongly recommends** using our [Gravity™ Analog Isolator](#). It is 100% effective at preventing electrical currents in the water from entering the probe and interfering with the readings.



Refer to the [Gravity™ Analog Isolator datasheet](#) for more information about how the isolator works and how to use it.

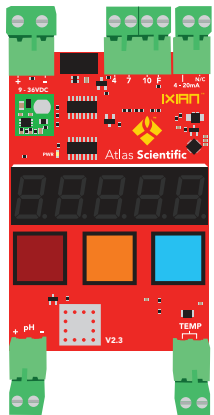
# Calibration

Using the [free downloadable arduino software](#), one, two or three-point calibration can be performed. The calibration procedure requires standard pH calibration buffers (pH 4, 7, and 10). Any brand of pH quality calibration buffers can be used.

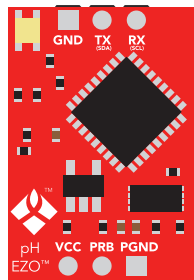


# Temperature compensated readings

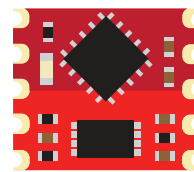
The Atlas Scientific Gravity™ Analog pH Sensor / Meter lacks the accuracy necessary for temperature compensation to have a meaningful effect on the readings. If more accuracy is required, Atlas Scientific offers a wide range of embedded pH monitoring products that are significantly more accurate than this device.



**IXIAN-pH™**  
pH Transmitter



**EZO-pH™**  
Embedded pH Circuit



**OEM-pH™**  
Embedded pH Circuit

# EZO-EC™

**Embedded Conductivity Circuit**

**ISO 7888 Compliant**

(determination of electrical conductivity)

Reads **Conductivity =  $\mu\text{S}/\text{cm}$**   
**Total dissolved solids = ppm**  
**Salinity = PSU (ppt) 0.00 – 42.00**  
**Specific gravity**  
*(sea water only) = 1.00 – 1.300*

Range **0.07 – 500,000+  $\mu\text{S}/\text{cm}$**

Accuracy **+/- 2%**

EC reading time **600ms**

Supported probes **K 0.01 – K 10.2 any brand**

Calibration **2 or 3 point**

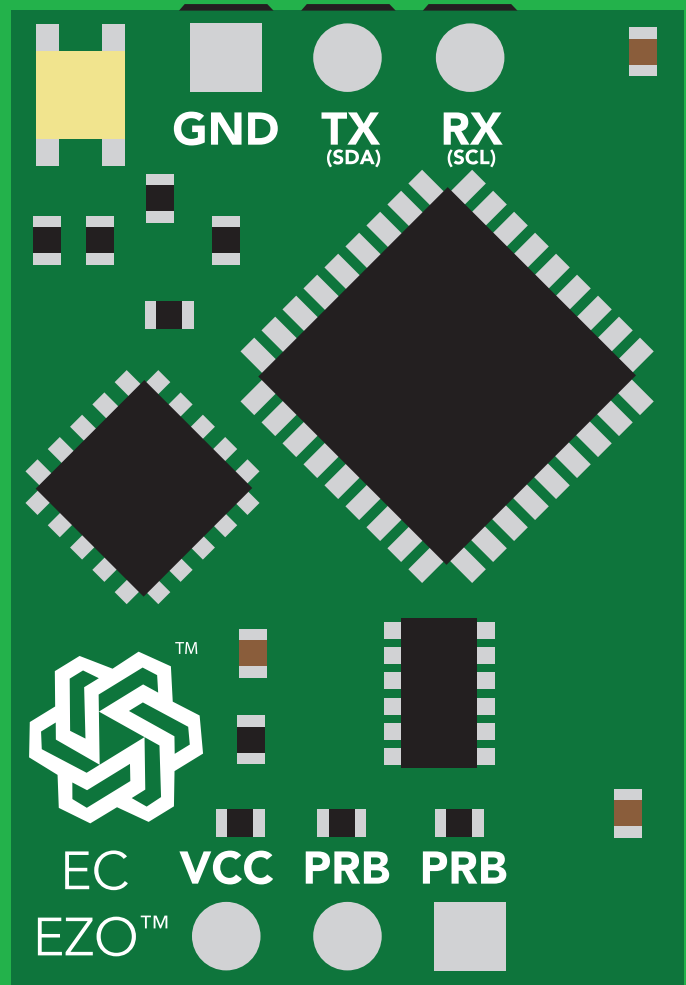
Temp compensation **Yes**

Data protocol **UART & I<sup>2</sup>C**

Default I<sup>2</sup>C address **100 (0x64)**

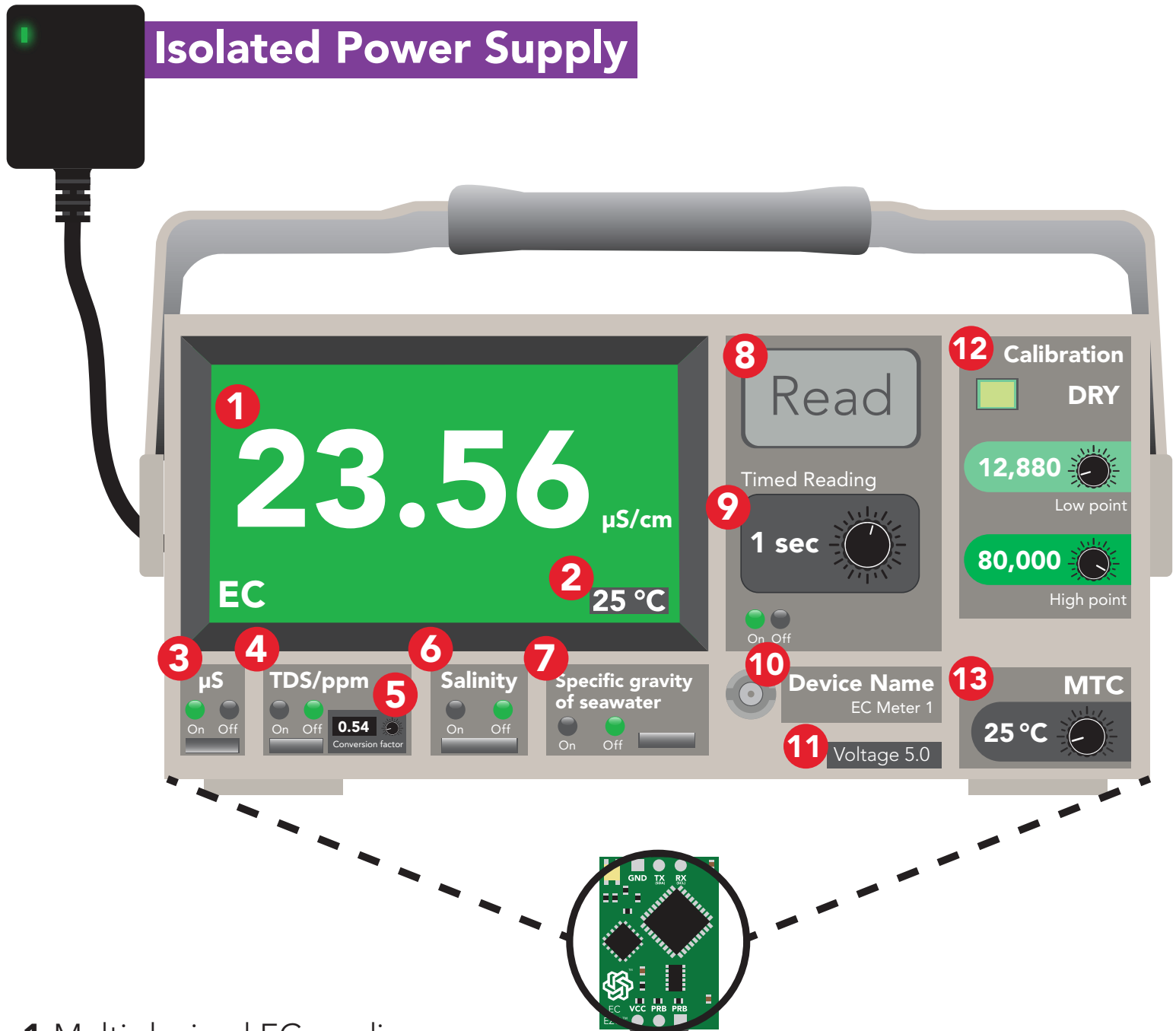
Operating voltage **3.3V – 5V**

Data format **ASCII**



**PATENT PROTECTED**

The EZO™ EC Circuit has all the features of this bench top meter.



- 1 Multi decimal EC reading
- 2 Temperature used for reading
- 3 Enable EC readings
- 4 Enable TDS/ ppm readings
- 5 Variable TDS conversion factor
- 6 Enable salinity readings
- 7 Enable specific gravity readings
- 8 Immediate reading
- 9 Timed readings
- 10 Set device name
- 11 Voltage usage
- 12 Multi-point variable calibration
- 13 Temperature compensation

The EZO Complete-EC™ is compatible with any brand of EC probe from K 0.01–K10.2

# Conductivity probe range

The EZO™ Conductivity circuit is compatible with any brand of two-conductor conductivity probe, ranging from:

**K 0.01**



**K 10.2**

Atlas Scientific™ has tested three different K value probe types:

**K 0.1**



**accurate reading range**

**0.07 $\mu$ S/cm – 50,000 $\mu$ S/cm**

TDS (ppm) 0 – 25,000

Salinity (ppt) 0 – 33

**K 1.0**



**accurate reading range**

**5 $\mu$ S/cm – 200,000+ $\mu$ S/cm**

TDS (ppm) 2 – 100,000

Salinity (ppt) 0 – 42\*

*\*salinity scale cannot go any higher*

**K 10**



**accurate reading range**

**10 $\mu$ S/cm – 1S/cm**

TDS (ppm) 5 – 500,000

Salinity (ppt) 0 – 42\*

*\*salinity scale cannot go any higher*

Atlas Scientific™ does not know what the accurate reading range would be for conductivity probes, other than the above mentioned values. Determining the accurate reading range of such probes, i.e. **K 2.6**, or **K 0.66**, is the responsibility of the embedded systems engineer.

# Resolution

The EZO™ Conductivity circuit, employs a method of scaling resolution. As the conductivity increases the resolution between readings decreases.

The EZO™ Conductivity circuit will output conductivity readings where the first **4 digits** are valid and the others are set to 0. This excludes conductivity readings that are less than 9.99. In that case, only 3 conductivity digits will be output.

0.07 – 99.99

Resolution = **0.01 $\mu$ S/cm**

100.1 – 999.9

Resolution = **0.1 $\mu$ S/cm**

1,000 – 9,999

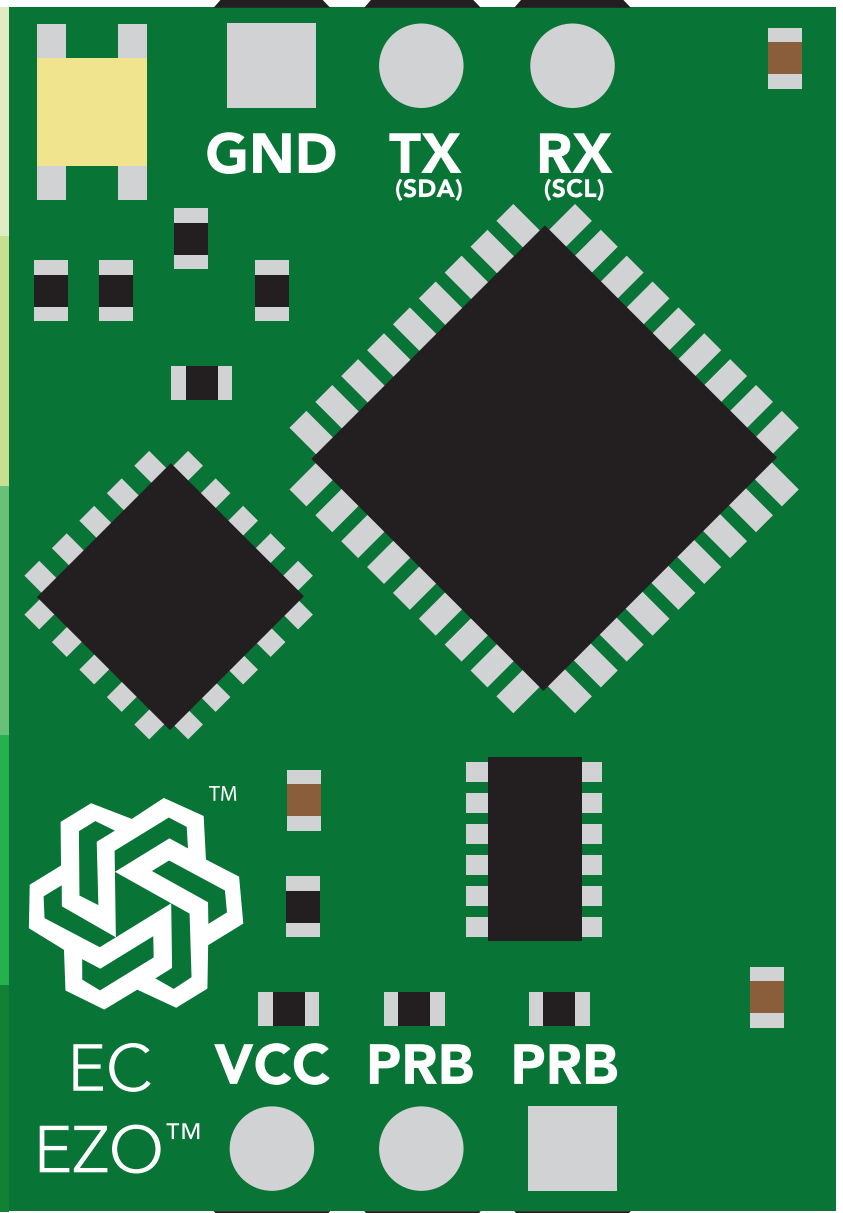
Resolution = **1.0 $\mu$ S/cm**

10,000 – 99,990

Resolution = **10 $\mu$ S/cm**

100,000 – 999,900

Resolution = **100 $\mu$ S/cm**



# ✓ Available data protocols

# UART

Default

# I<sup>2</sup>C

# ✗ Unavailable data protocols

# SPI

# Analog

# RS-485

# Mod Bus

# 4–20mA

# STOP



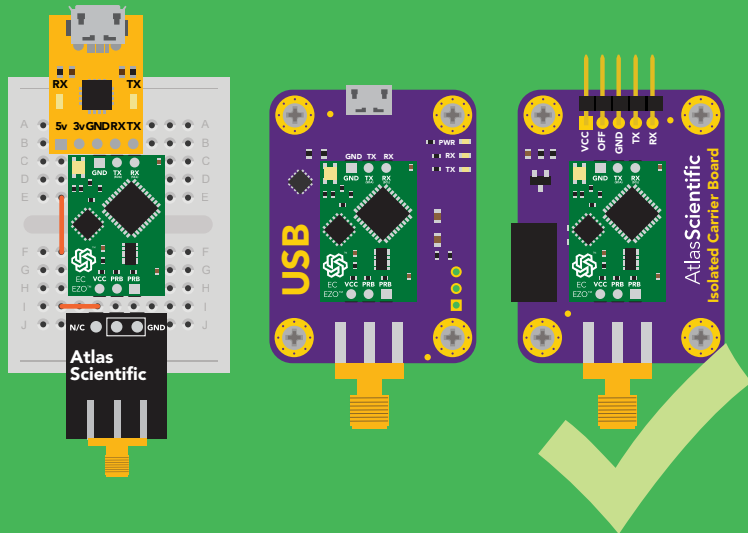
**SOLDERING THIS DEVICE VOIDS YOUR WARRANTY.**

Are there specific soldering instructions? **Yes, see page 73.**

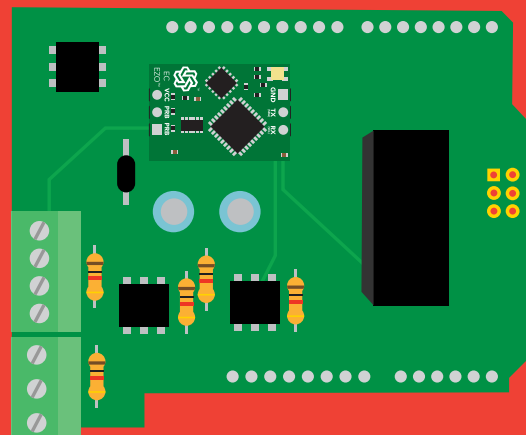
Can you make a warranty claim after soldering? **No.**

If you have not used this product before; Observe how a properly working sensor behaves **BEFORE** embedding it into your PCB.

Get this device working using one of these methods first.



Do not embed before you have experience with this sensor.



# Table of contents

Available data protocols	5	Correct wiring	11
Circuit dimensions	8	Default state	12
Power consumption	8	Circuit footprint	75
Absolute max ratings	8	Datasheet change log	76
Electrical isolation	9	Warranty	81
Conductivity probe range	3		
Resolution	4		
Calibration theory	65		

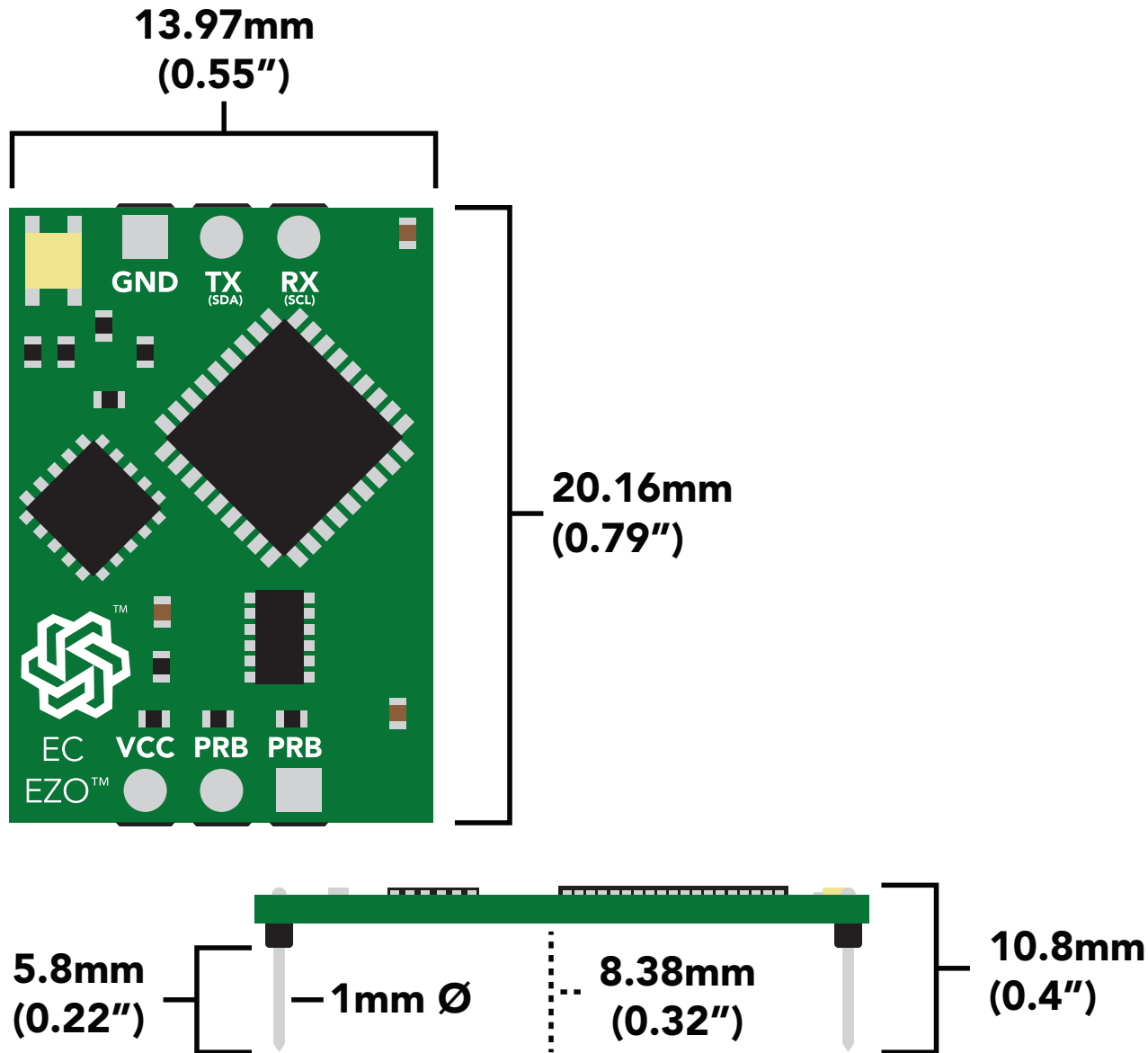
## UART

UART mode	13
LED color definition	14
Receiving data from device	15
Sending commands to device	16
<b>UART quick command page</b>	<b>17</b>
LED control	18
Find	19
Continuous reading mode	20
Single reading mode	21
Calibration	22
Change TDS conversion factor	23
Export calibration	24
Import calibration	25
Setting the probe type	26
Temperature compensation	27
Enable/disable parameters	28
Naming device	29
Device information	30
Response codes	31
Reading device status	32
Sleep mode/low power	33
Change baud rate	34
Protocol lock	35
Factory reset	36
Change to I <sup>2</sup> C mode	37
Manual switching to I <sup>2</sup> C	38

## I<sup>2</sup>C

I <sup>2</sup> C mode	40
Sending commands	41
Requesting data	42
Response codes	43
LED color definition	44
<b>I<sup>2</sup>C quick command page</b>	<b>45</b>
LED control	46
Find	47
Taking reading	48
Calibration	49
Change TDS conversion factor	50
Export calibration	51
Import calibration	52
Setting the probe type	53
Temperature compensation	54
Enable/disable parameters	55
Naming device	56
Device information	57
Reading device status	58
Sleep mode/low power	59
Protocol lock	60
I <sup>2</sup> C address change	61
Factory reset	62
Change to UART mode	63
Manual switching to UART	64

# EZO™ circuit dimensions



## Power consumption

	LED	MAX	STANDBY	SLEEP
<b>5V</b>	ON	50 mA	18.14 mA	0.7 mA
	OFF	45 mA	15.64 mA	
<b>3.3V</b>	ON	35 mA	16.85 mA	0.4 mA
	OFF	34 mA	15.85 mA	

## Absolute max ratings

Parameter	MIN	TYP	MAX
Storage temperature (EZO™ Conductivity)	-60 °C		150 °C
Operational temperature (EZO™ Conductivity)	-40 °C	25 °C	125 °C
VCC	3.3V	5V	5.5V

# Electrical isolation

Conductivity readings will introduce significant electrical interference into your water. This electrical interference will affect other sensors, such as pH, ORP, and dissolved oxygen. Electrical isolation is 100% effective in preventing this electrical interference.

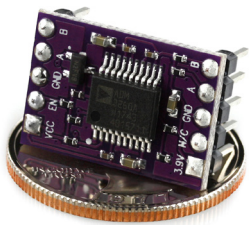
Unlike other probes, a conductivity probe provides a low-resistance pathway from your water to your electronics. If an accidental electrical surge passes through your water, it will travel up your conductivity probe and into your electronics. Electrical isolation is 100% effective at stopping an accidental electrical surge from destroying your computer system.



## Advice:

When reading conductivity along with other sensors, electrical isolation is strongly recommended. **Never build a commercial product without electrical isolation.**

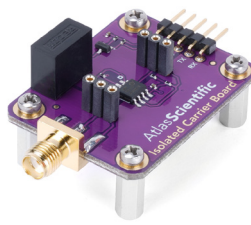
Atlas Scientific offers several different electrical isolation products that can be used in your design. Select the electrical isolation product that works best for your design.



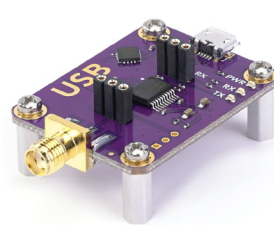
Basic EZO™  
Inline Voltage Isolator



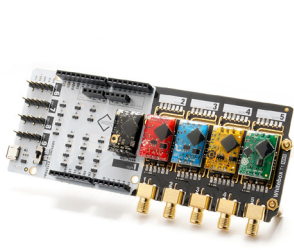
Vertical Isolator



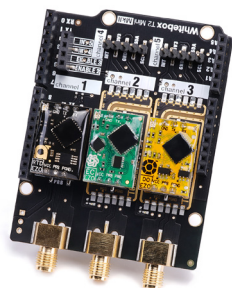
Electrically Isolated  
EZO™ Carrier Board



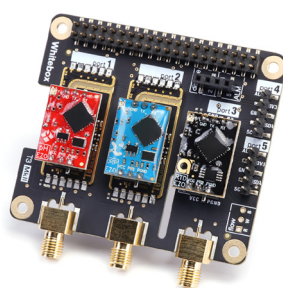
Gen 2 Electrically Isolated  
USB EZO™ Carrier Board



Whitebox T1



Whitebox T3



Whitebox T3



Electrically Isolated EZO™  
Carrier Board (old style)

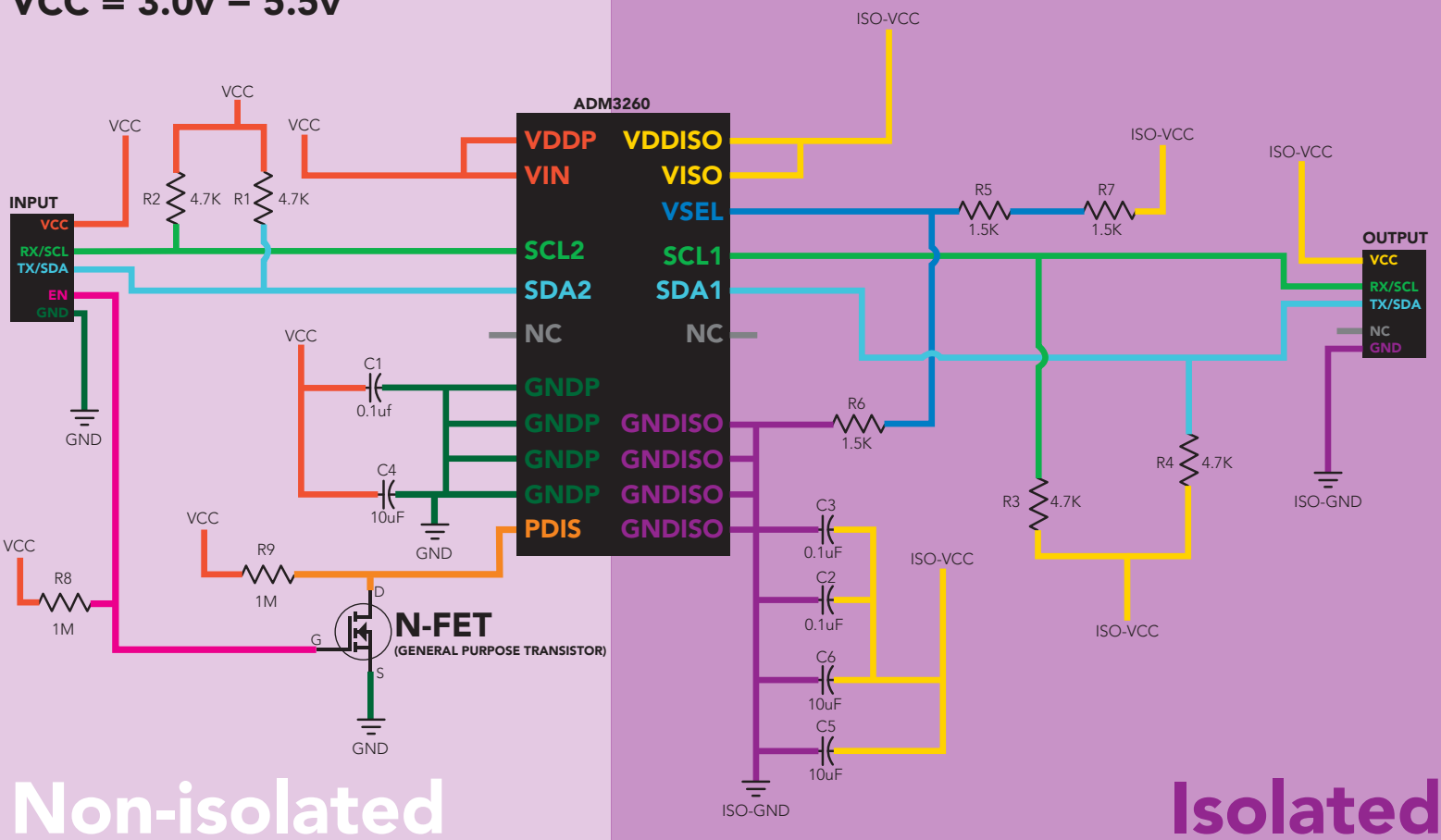
For various reasons, you may need to build your own electrical isolator. Because electrical isolation is so important, we have published our isolation schematic for anyone to use.

This isolation schematic is based on the ADM3260, which can output up to 150 mW of isolated power. PCB layout requires special attention for EMI/EMC and RF Control. Having good ground planes and keeping the capacitors as close to the chip as possible are crucial for proper performance.

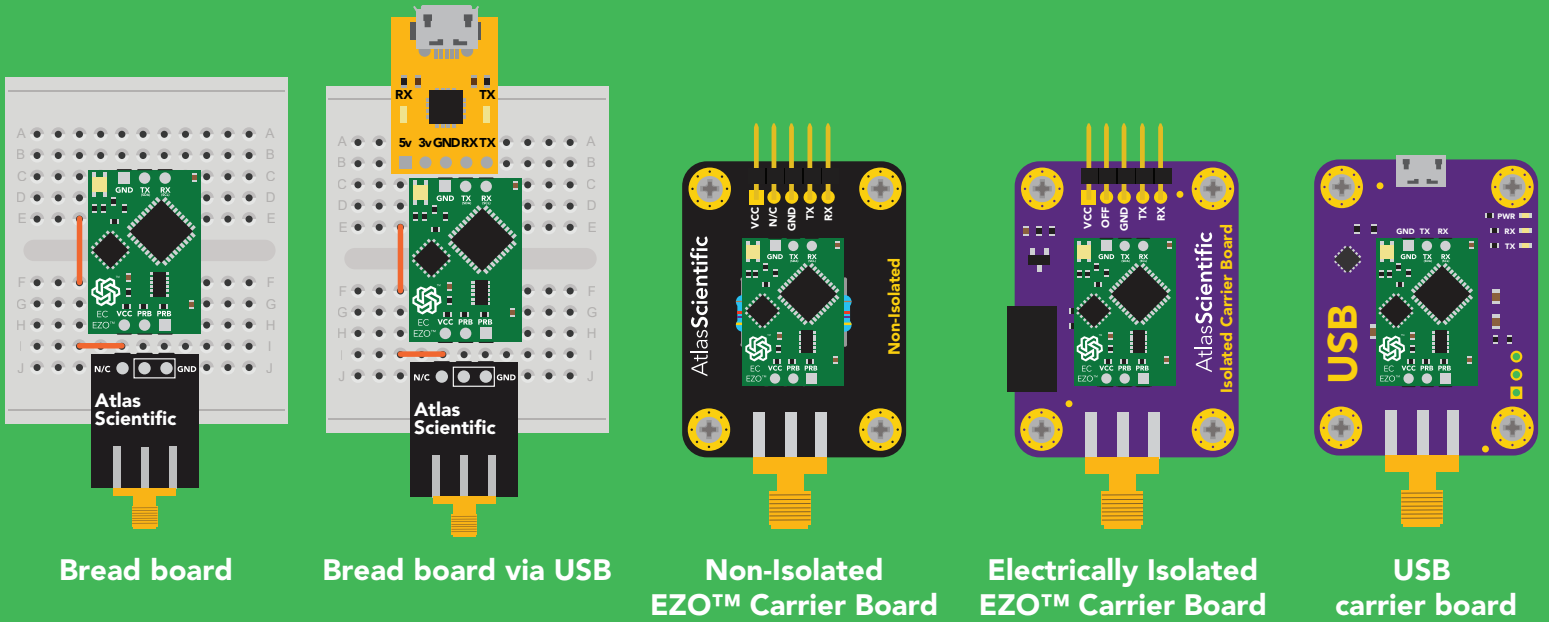
The two data channels have a 4.7kΩ pull-up resistor on both the isolated and non-isolated lines (R1, R2, R3, and R4). The output voltage is set using a voltage divider (R5, R6, and R7). This produces a voltage of 3.9V regardless of your input voltage.

**Isolated ground is different from non-isolated ground, these two lines should not be connected together.**

**VCC = 3.0v – 5.5v**



# ✓ Correct wiring



Bread board

Bread board via USB

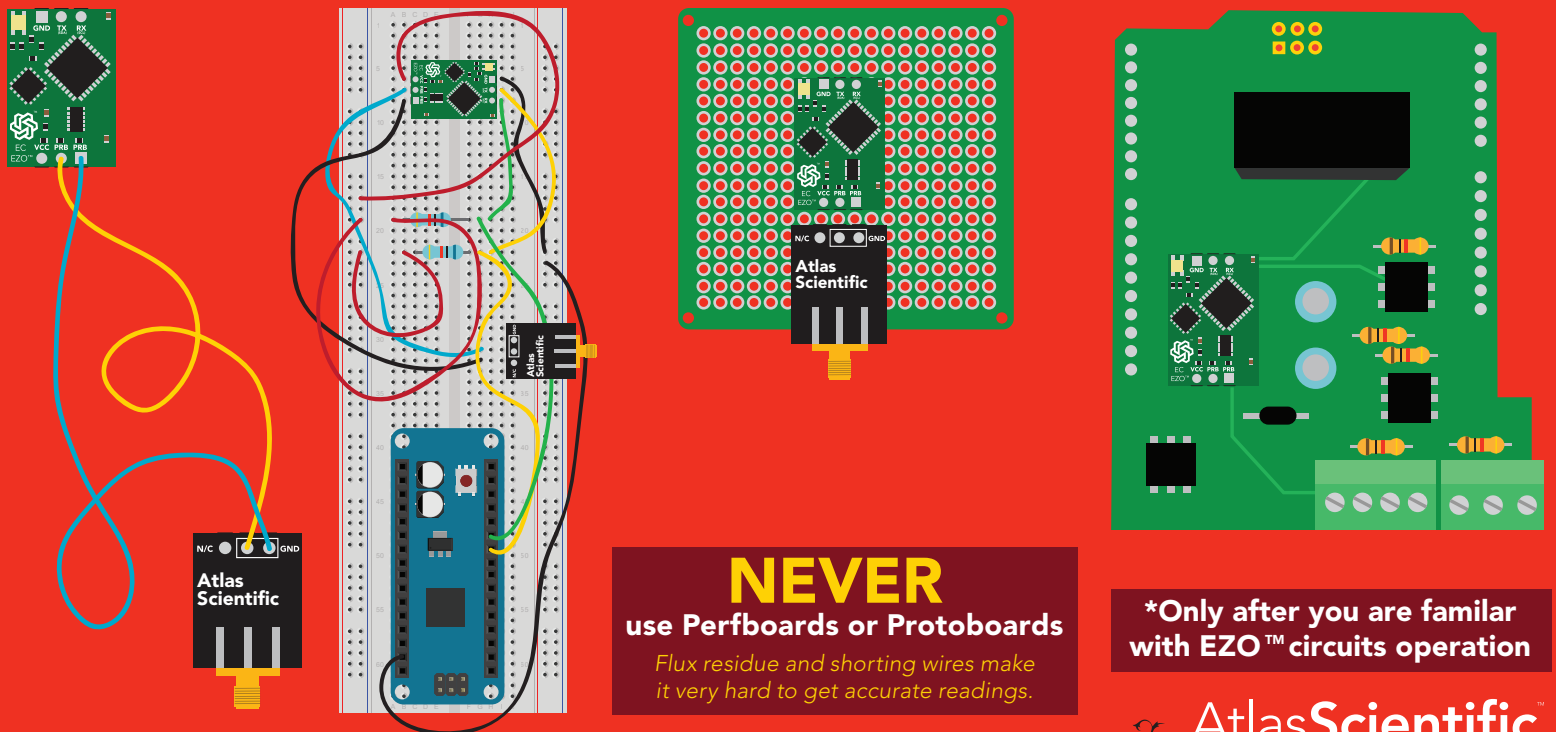
Non-Isolated  
EZO™ Carrier Board

Electrically Isolated  
EZO™ Carrier Board

USB  
carrier board

# X Incorrect wiring

Extended leads      Sloppy setup      Perfboards or Protoboards      \*Embedded into your device



**NEVER**  
use Perfboards or Protoboards

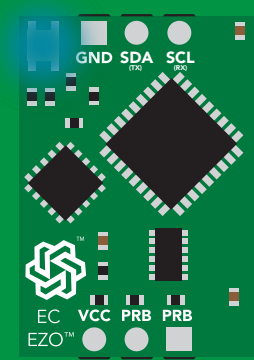
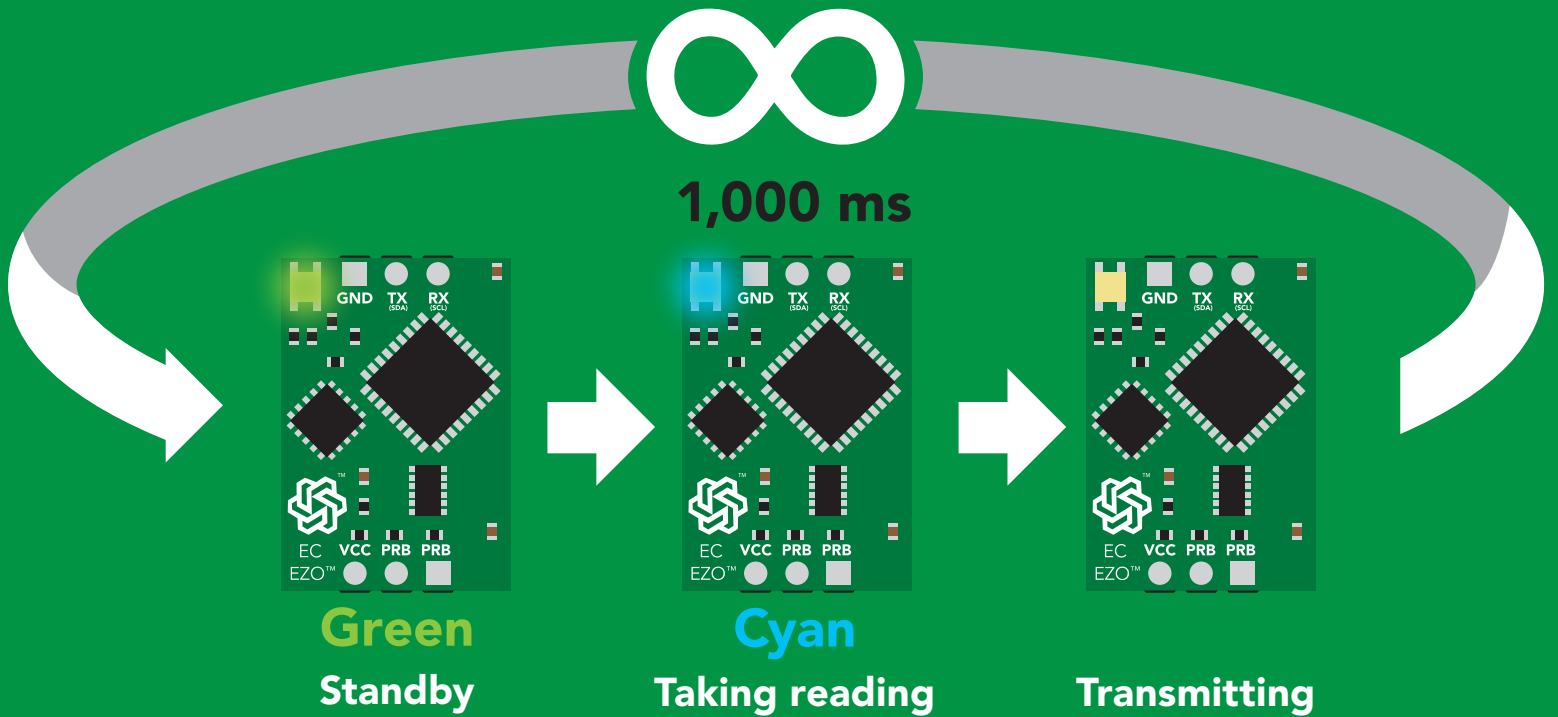
*Flux residue and shorting wires make it very hard to get accurate readings.*

**\*Only after you are familiar with EZO™ circuits operation**

# Default state

# UART mode

**Baud** 9,600  
**Readings** continuous  
**Units**  $\mu\text{S}/\text{cm}$   
**Speed** 1 reading per second  
**LED** on



**Solid Blue LED**  
in I<sup>2</sup>C mode  
Not UART ready

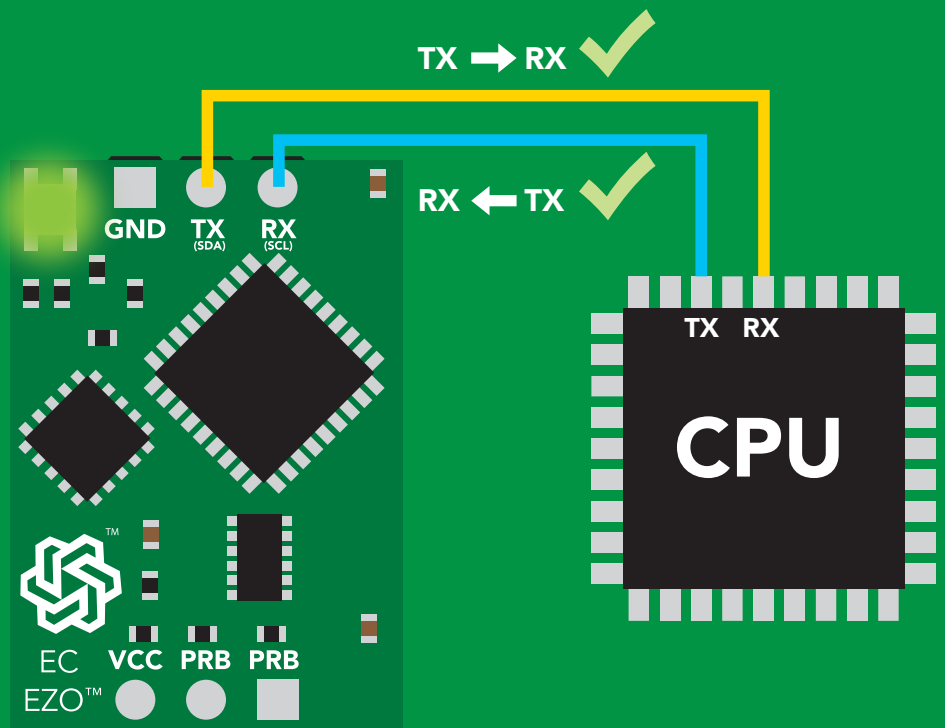
# UART mode

8 data bits      no parity  
1 stop bit        no flow control

**Baud** 300  
1,200  
2,400  
**9,600 default**  
19,200  
38,400  
57,600  
115,200



**Vcc** 3.3V – 5.5V



# Data format

## Reading

Conductivity = **Default**

Total dissolved solids }  
Salinity } = Must be enabled  
Specific gravity }

**Order** EC, TDS, SAL, SG

**Encoding** ASCII

**Format** string

## Terminator

**Data type**

**Decimal places** 3

**Smallest string** 3 characters

**Largest string** 40 characters

**carriage return**

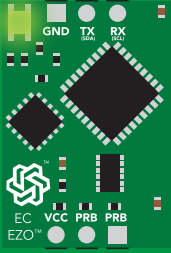
**floating point**

3

3 characters

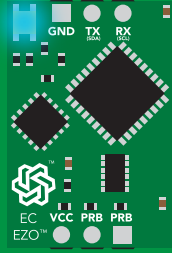
40 characters

# LED color definition



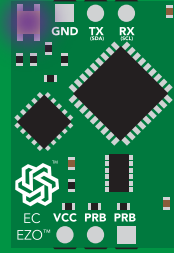
**Green**

UART standby



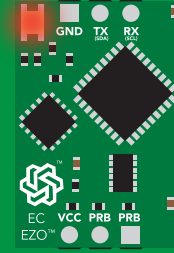
**Cyan**

Taking reading



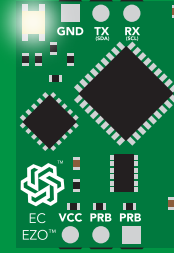
**Purple**

Changing  
baud rate



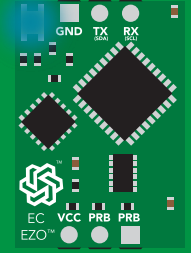
**Red**

Command  
not understood



**White**

Find



**Blue**

I2C standby

**5V**

LED ON

**+2.5 mA**

**3.3V**

**+1 mA**

## Settings that are retained if power is cut

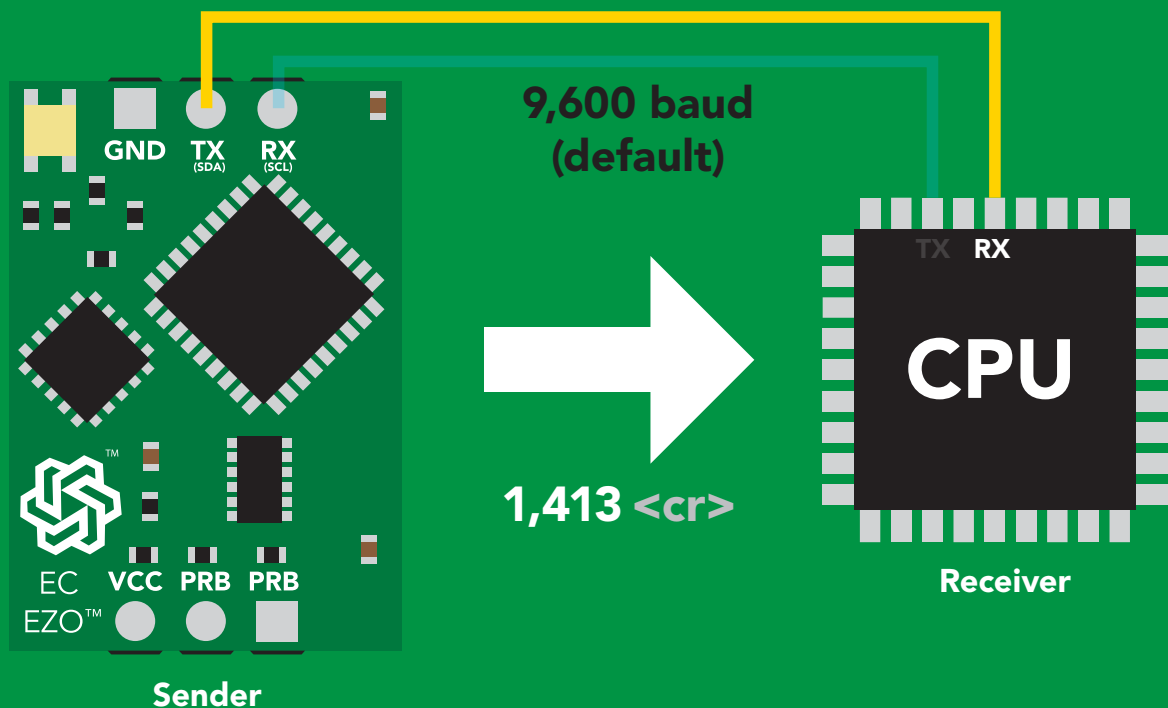
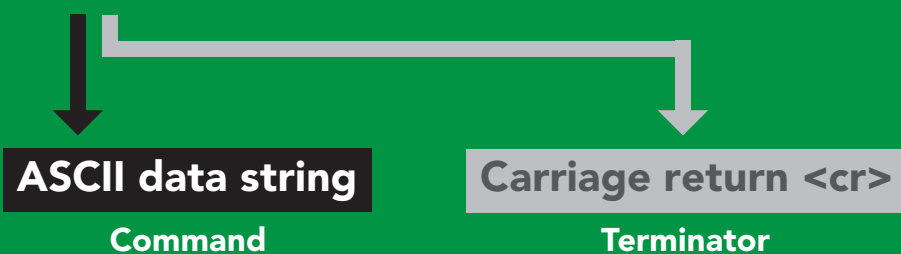
- Baud rate
- Calibration
- Continuous mode
- Device name
- Enable/disable parameters
- Enable/disable response codes
- Hardware switch to I<sup>2</sup>C mode
- LED control
- Protocol lock
- Software switch to I<sup>2</sup>C mode

## Settings that are **NOT** retained if power is cut

- Find
- Sleep mode
- Temperature compensation

# Receiving data from device

2 parts



## Advanced

ASCII: 1 , 4 1 3 <cr>

Hex: 31 2C 34 31 33 0D

Dec: 49 44 52 49 51 13

# Sending commands to device

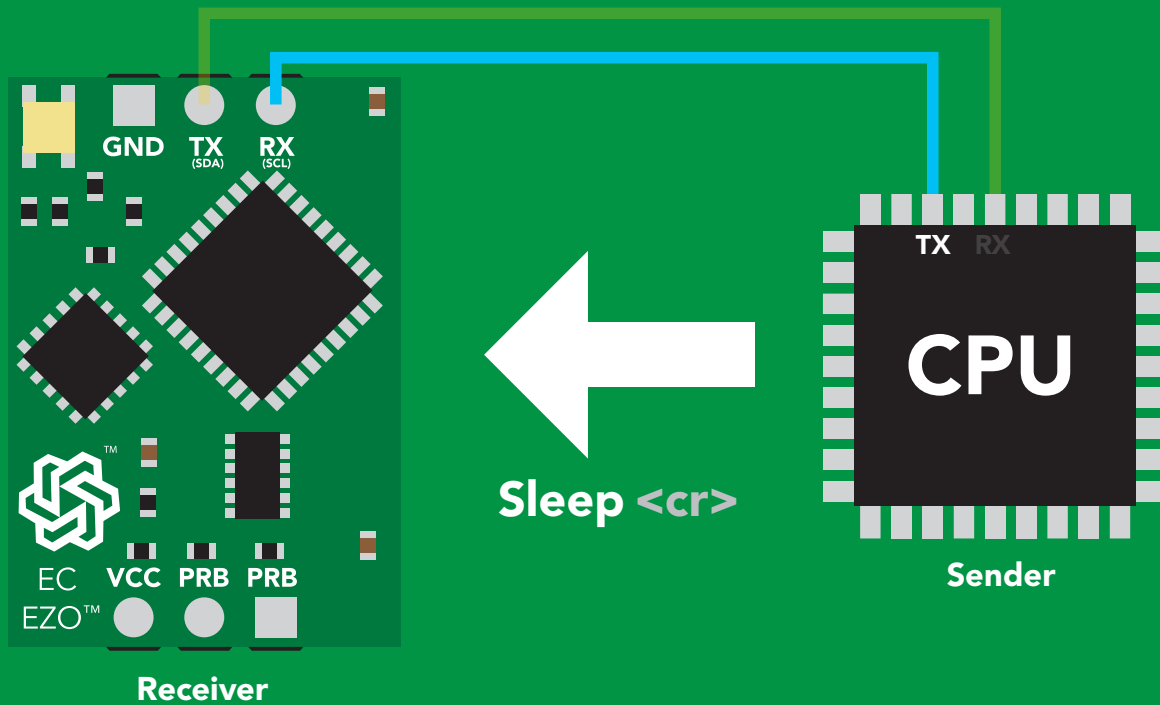
2 parts

**Command (not case sensitive)**

ASCII data string

**Carriage return <cr>**

Terminator



## Advanced

ASCII: **S** **I** **e** **e** **p** **<cr>**

Hex: **53** **6C** **65** **65** **70** **0D**

Dec: **83** **108** **101** **101** **112** **13**

# UART mode

## command quick reference

All commands are ASCII strings or single ASCII characters.

Command	Function		Default state
Baud	change baud rate	pg. 34	9,600
C	enable/disable continuous reading	pg. 20	enabled
Cal	performs calibration	pg. 22	n/a
Export	export calibration	pg. 24	n/a
Factory	enable factory reset	pg. 36	n/a
Find	finds device with blinking white LED	pg. 19	n/a
i	device information	pg. 30	n/a
I2C	change to I <sup>2</sup> C mode	pg. 37	not set
Import	import calibration	pg. 25	n/a
K	Set probe type	pg. 26	K 1.0
L	enable/disable LED	pg. 18	enabled
Name	set/show name of device	pg. 29	not set
O	enable/disable parameters	pg. 28	all enabled
Plock	enable/disable protocol lock	pg. 35	disabled
R	returns a single reading	pg. 21	n/a
Sleep	enter sleep mode/low power	pg. 33	n/a
Status	retrieve status information	pg. 32	enable
T	temperature compensation	pg. 27	25°C
TDS	change the TDS conversion factor	pg. 23	0.54
*OK	enable/disable response codes	pg. 31	enable

# LED control

## Command syntax

L,1 <cr> LED on **default**

L,0 <cr> LED off

L,? <cr> LED state on/off?

## Example

## Response

L,1 <cr>

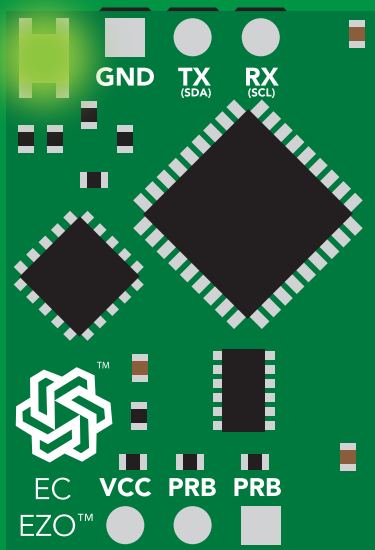
\*OK <cr>

L,0 <cr>

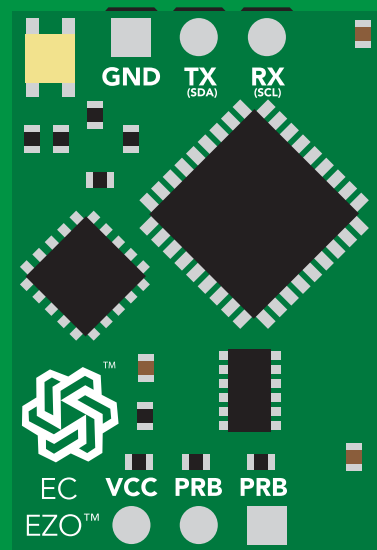
\*OK <cr>

L,? <cr>

?L,1 <cr> or ?L,0 <cr>  
\*OK <cr>



L,1



L,0

# Find

## Command syntax

This command will disable continuous mode  
Send any character or command to terminate find.

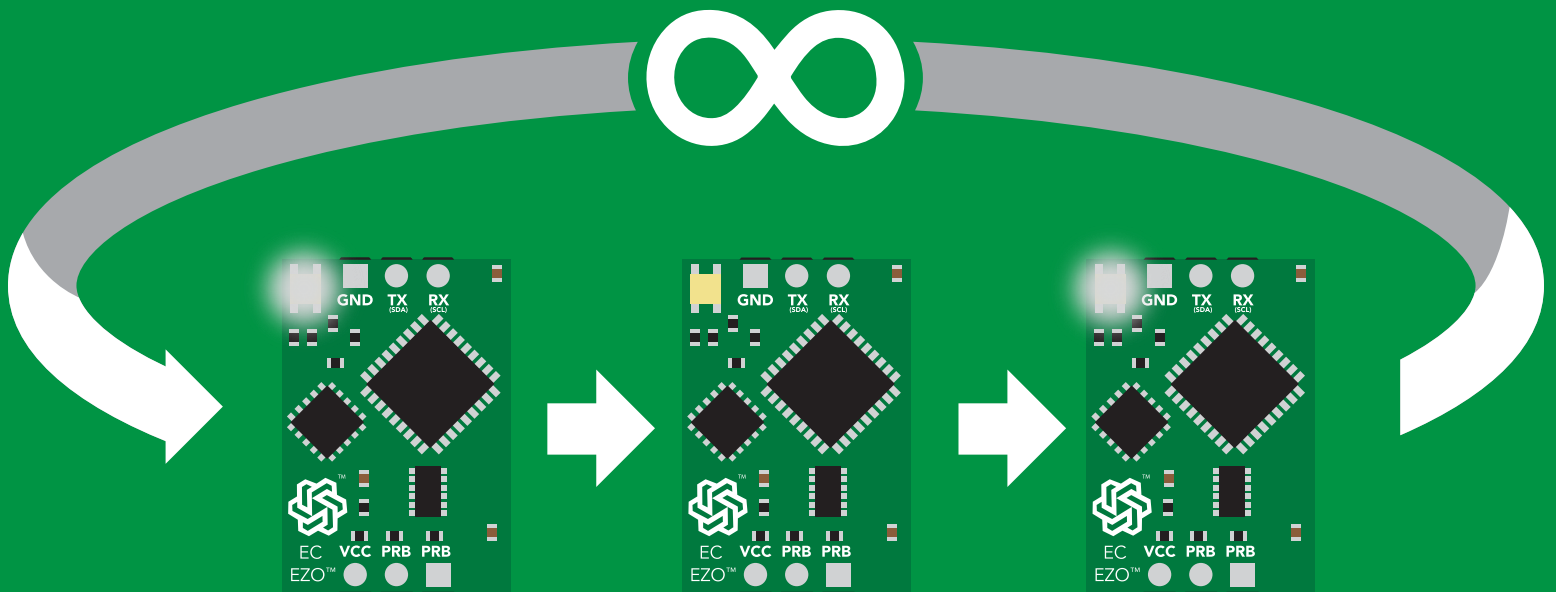
Find <cr> LED rapidly blinks white, used to help find device

## Example

## Response

Find <cr>

\*OK <cr>



# Continuous reading mode

## Command syntax

- C,1 <cr>** enable continuous readings once per second **default**
- C,n <cr>** continuous readings every n seconds (n = 2 to 99 sec)
- C,0 <cr>** disable continuous readings
- C,? <cr>** continuous reading mode on/off?

## Example

## Response

**C,1 <cr>**

**\*OK <cr>**  
**EC,TDS,SAL,SG (1 sec) <cr>**  
**EC,TDS,SAL,SG (2 sec) <cr>**  
**EC,TDS,SAL,SG (3 sec) <cr>**

**C,30 <cr>**

**\*OK <cr>**  
**EC,TDS,SAL,SG (30 sec) <cr>**  
**EC,TDS,SAL,SG (60 sec) <cr>**  
**EC,TDS,SAL,SG (90 sec) <cr>**

**C,0 <cr>**

**\*OK <cr>**

**C,? <cr>**

**?C,1 <cr> or ?C,0 <cr> or ?C,30 <cr>**  
**\*OK <cr>**

# Single reading mode

## Command syntax

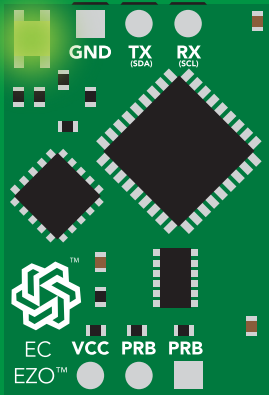
R <cr> takes single reading

### Example

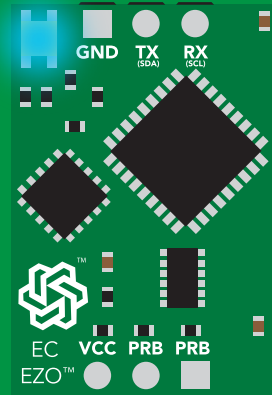
R <cr>

### Response

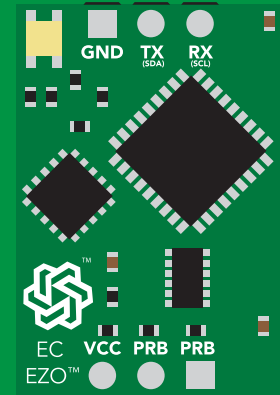
1,413 <cr>  
\*OK <cr>



**Green**  
Standby



**Cyan**  
Taking reading



**Red**  
Transmitting



600 ms

# Calibration

## Command syntax

Dry calibration must always be done first!

Cal,dry	<cr>	dry calibration
Cal,n	<cr>	single point calibration, where n = any value
Cal,low,n	<cr>	low end calibration, where n = any value
Cal,high,n	<cr>	high end calibration, where n = any value
Cal,clear	<cr>	delete calibration data
Cal,?	<cr>	device calibrated?

## Example

## Response

Cal,dry <cr>	*OK <cr>
Cal,84 <cr>	*OK <cr>
Cal,low,12880 <cr>	*OK <cr>
Cal,high,80000 <cr>	*OK <cr>
Cal,clear <cr>	*OK <cr>
Cal,? <cr>	?CAL,0 <cr> or ?CAL,1 <cr> or ?CAL,2 one point two point *OK <cr>

### One point calibration:

Step 1. "cal,dry"

Step 2. "cal,n"

**Calibration complete!**

### Two point calibration:

Step 1 "cal,dry"

Step 2 "cal,low,n"

Step 3 "cal,high.n"

**Calibration complete!**

# Changing the TDS (ppm) conversion factor

## Command syntax

There are several different conversion factors used to read TDS(ppm). For some applications, it may be necessary to use a conversion factor other than the default value of 0.54

**TDS,n** <cr> set custom conversion factor, n = any value between 0.01 – 1.00  
**TDS,?** <cr> conversion factor being used

## Example

## Response

**TDS,?** <cr>

?TDS,0.54 <cr>  
\*OK <cr>

**R** <cr>

EC TDS  
↓ ↓  
100,54 <cr>  
\*OK <cr>

**TDS,0.46** <cr>

\*OK <cr>

**R** <cr>

EC TDS  
↓ ↓  
100,46 <cr>  
\*OK <cr>

## Common conversion factors

NaCl 0.47 – 0.50  
KCL 0.50 - 0.57  
"442" 0.65 – 0.85

## Formula

EC x conversion factor = TDS

# Export calibration

## Command syntax

Export: Use this command to download calibration settings

**Export,?** <cr> calibration string info

**Export** <cr> export calibration string from calibrated device

## Example

## Response

**Export,?** <cr>

**10,120** <cr>

### Response breakdown

**10, 120**

# of strings to export

# of bytes to export

Export strings can be up to 12 characters long, and is always followed by <cr>

**Export** <cr>

**59 6F 75 20 61 72** <cr> (1 of 10)

**Export** <cr>

**65 20 61 20 63 6F** <cr> (2 of 10)

**(7 more)**

⋮

**Export** <cr>

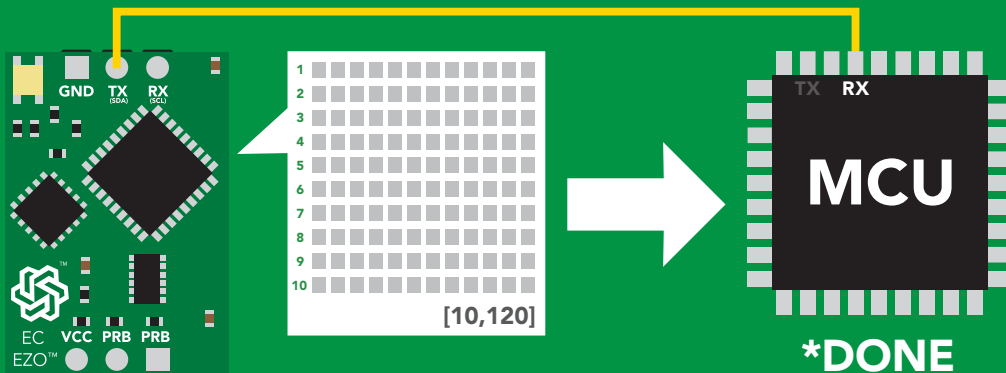
**6F 6C 20 67 75 79** <cr> (10 of 10)

**Export** <cr>

**\*DONE**

Disabling \*OK simplifies this process

**Export** <cr>



# Import calibration

## Command syntax

Import: Use this command to upload calibration settings to one or more devices.

Import,n <cr> import calibration string to new device

## Example

Import, 59 6F 75 20 61 72 <cr> (1 of 10)

Import, 65 20 61 20 63 6F <cr> (2 of 10)

⋮

Import, 6F 6C 20 67 75 79 <cr> (10 of 10)

## Response

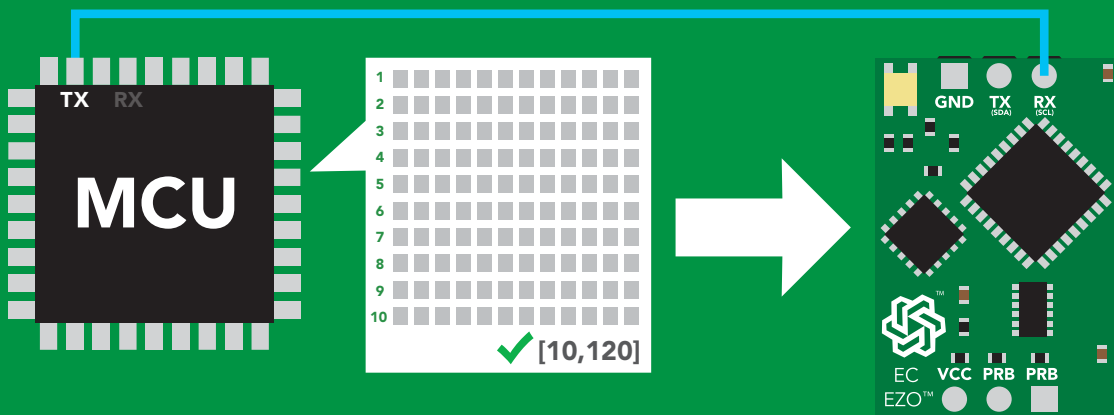
\*OK <cr>

\*OK <cr>

⋮

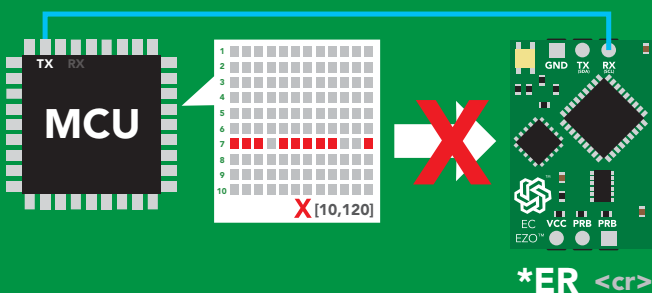
\*OK <cr>

Import,n <cr>



\*OK <cr>

system will reboot



\* If one of the imported strings is not correctly entered, the device will not accept the import, respond with \*ER and reboot.

# Setting the probe type

## Command syntax

K 1.0 is the default value

**K,n** <cr> n = any value; floating point in ASCII

**K,?** <cr> probe K value?

### Example

### Response

**K,10** <cr>

**\*OK** <cr>

**K,?** <cr>

**?K,10** <cr>

**\*OK** <cr>



**K 0.1**



**K 1.0**



**K 10**

# Temperature compensation

## Command syntax

Default temperature = 25°C  
Temperature is always in Celsius  
Temperature is not retained if power is cut

**T,n** <cr> n = any value; floating point or int

**T,?** <cr> compensated temperature value?

**RT,n** <cr> set temperature compensation and take a reading

## Example

## Response

**T,19.5** <cr>

**\*OK** <cr>

**RT,19.5** <cr>

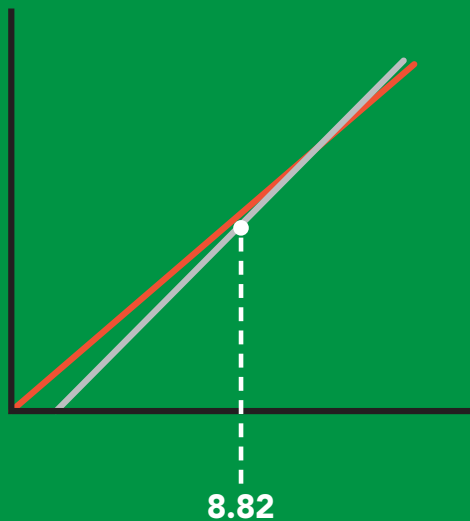
**\*OK** <cr>

**8.91** <cr>

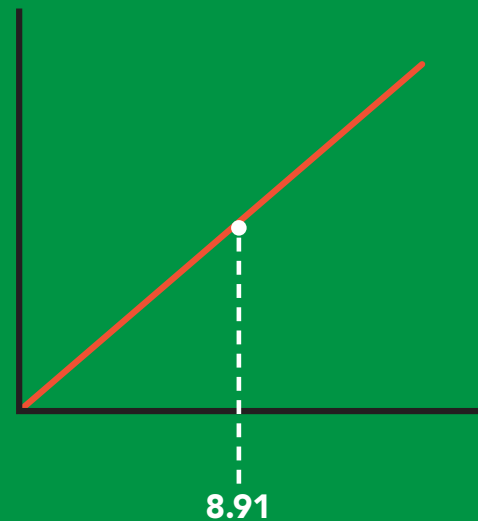
**T,?** <cr>

**?T,19.5** <cr>

**\*OK** <cr>



→  
**T,19.5** <cr>



# Enable/disable parameters from output string

## Command syntax

O, [parameter],[1,0] <cr> enable or disable output parameter  
O,? <cr> enabled parameter?

### Example

O,EC,1 / O,EC,0 <cr>

### Response

\*OK <cr> enable / disable conductivity

O,TDS,1 / O,TDS,0 <cr>

\*OK <cr> enable / disable total dissolved solids

O,S,1 / O,S,0 <cr>

\*OK <cr> enable / disable salinity

O,SG,1 / O,SG,0 <cr>

\*OK <cr> enable / disable specific gravity

O,? <cr>

?,O,EC,TDS,S,SG <cr> if all are enabled

### Parameters

EC Conductivity =  $\mu\text{S}/\text{cm}$   
TDS Total dissolved solids = ppm  
S Salinity = PSU (ppt) 0.00 – 42.00  
SG Specific gravity (sea water only) = 1.00 – 1.300

\* If you disable all possible data types your readings will display "no output".

### Followed by 1 or 0

1 enabled  
0 disabled

# Naming device

## Command syntax

Do not use spaces in the name

Name,n <cr> set name

Name, <cr> clears name

Name,? <cr> show name

n =

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16

Up to 16 ASCII characters

## Example

## Response

Name, <cr>

\*OK <cr> name has been cleared

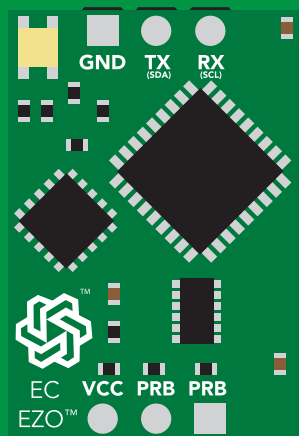
Name,zzt <cr>

\*OK <cr>

Name,? <cr>

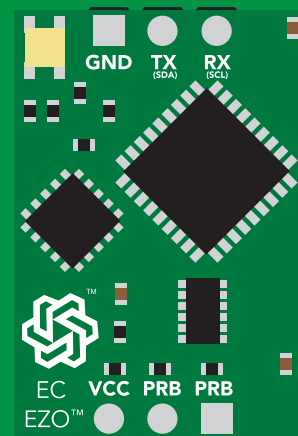
?Name,zzt <cr>  
\*OK <cr>

Name,zzt



\*OK <cr>

Name,?



?Name,zzt <cr>  
\*OK <cr>

# Device information

## Command syntax

```
i <cr> device information
```

### Example

```
i <cr>
```

### Response

```
?i,EC,2.16 <cr>  
*OK <cr>
```

## Response breakdown

?i,	EC,	2.16
	↑	↑
	Device	Firmware

# Response codes

## Command syntax

- \*OK,1** <cr> enable response **default**
- \*OK,0** <cr> disable response
- \*OK,?** <cr> response on/off?

## Example

## Response

**R** <cr>

**1,413** <cr>  
**\*OK** <cr>

**\*OK,0** <cr>

no response, **\*OK** disabled

**R** <cr>

**1,413** <cr> **\*OK** disabled

**\*OK,?** <cr>

**?\*OK,1** <cr> or **?\*OK,0** <cr>

## Other response codes

- \*ER** unknown command
- \*OV** over volt ( $VCC \geq 5.5V$ )
- \*UV** under volt ( $VCC \leq 3.1V$ )
- \*RS** reset
- \*RE** boot up complete, ready
- \*SL** entering sleep mode
- \*WA** wake up

**These response codes cannot be disabled**

# Reading device status

## Command syntax

Status <cr> voltage at Vcc pin and reason for last restart

### Example

```
Status <cr>
```

### Response

```
?Status,P,5.038 <cr>  
*OK <cr>
```

## Response breakdown

?Status,	P,	5.038
	↑	↑
	Reason for restart	Voltage at Vcc

### Restart codes

P	powered off
S	software reset
B	brown out
W	watchdog
U	unknown

# Sleep mode/low power

## Command syntax

Send any character or command to awaken device.

Sleep <cr> enter sleep mode/low power

## Example

## Response

Sleep <cr>

\*OK <cr>

\*SL <cr>

Any command

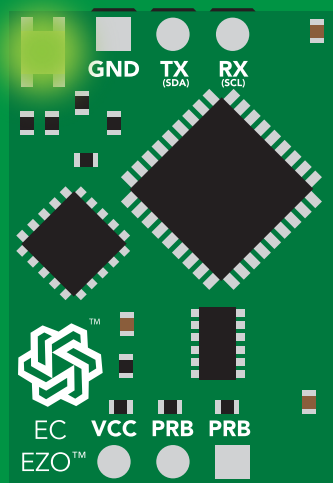
\*WA <cr> wakes up device

5V

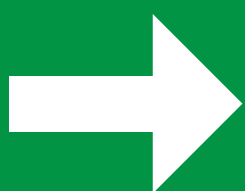
STANDBY	SLEEP
18.14 mA	0.7 mA

3.3V

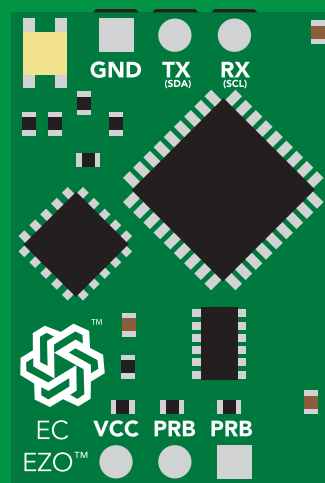
16.85 mA	0.4 mA
----------	--------



Standby  
18.14 mA



Sleep <cr>



Sleep  
0.7 mA

# Change baud rate

## Command syntax

Baud,n <cr> change baud rate

### Example

Baud,38400 <cr>

### Response

\*OK <cr>

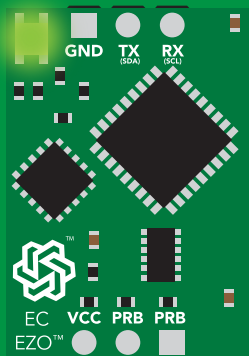
Baud,? <cr>

?Baud,38400 <cr>

\*OK <cr>

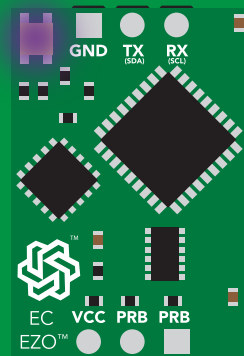
n =

- 300
- 1200
- 2400
- 9600 default**
- 19200
- 38400
- 57600
- 115200



Standby

Baud,38400 <cr>

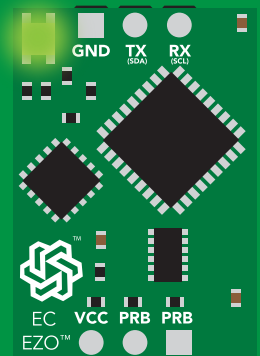


Changing  
baud rate

\*OK <cr>



(reboot)



Standby

# Protocol lock

## Command syntax

Locks device to UART mode.

Plock,1 <cr> enable Plock

Plock,0 <cr> disable Plock **default**

Plock,? <cr> Plock on/off?

## Example

## Response

Plock,1 <cr>

\*OK <cr>

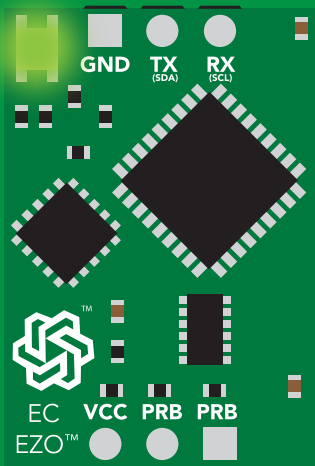
Plock,0 <cr>

\*OK <cr>

Plock,? <cr>

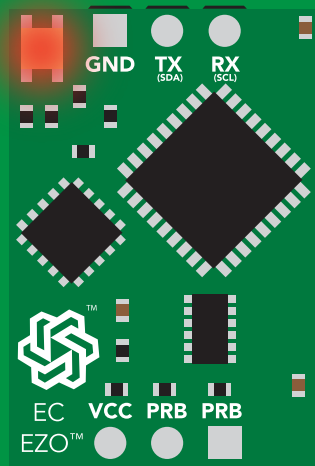
?Plock,1 <cr> or ?Plock,0 <cr>

### Plock,1



\*OK <cr>

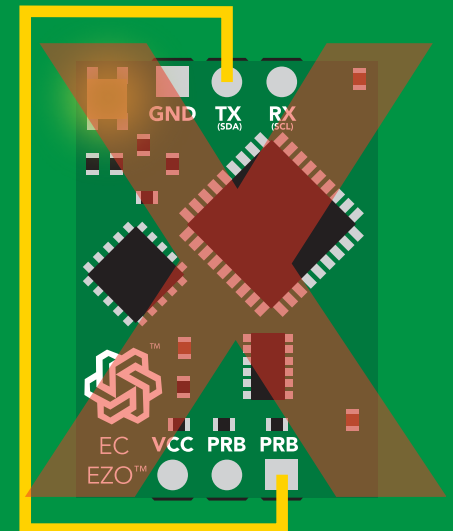
### I2C,100



cannot change to I<sup>2</sup>C

\*ER <cr>

### Short



cannot change to I<sup>2</sup>C

# Factory reset

## Command syntax

Clears calibration  
LED on  
"\*OK" enabled

Factory <cr> enable factory reset

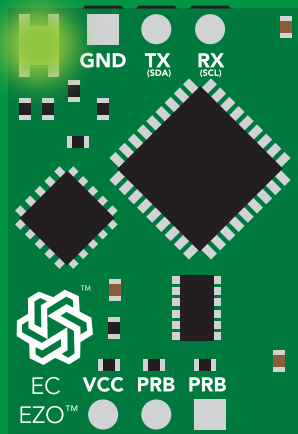
## Example

## Response

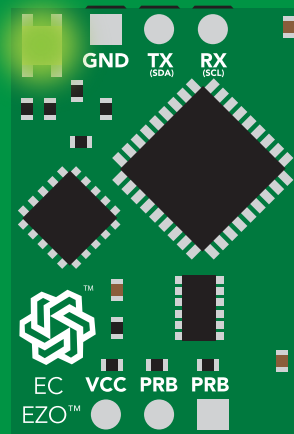
Factory <cr>

\*OK <cr>

Factory <cr>



(reboot)



\*OK <cr>

\*RS <cr>

\*RE <cr>

Baud rate will not change

# Change to I<sup>2</sup>C mode

## Command syntax

Default I<sup>2</sup>C address 100 (0x64)

I2C,n <cr> sets I<sup>2</sup>C address and reboots into I<sup>2</sup>C mode

n = any number 1 – 127

### Example

### Response

I2C,100 <cr>

\*OK (reboot in I<sup>2</sup>C mode)

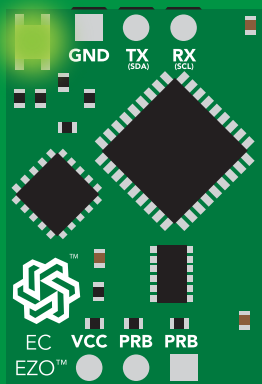
### Wrong example

### Response

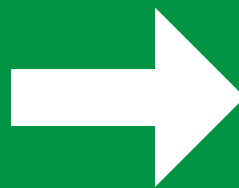
I2C,139 <cr> n ≠ 127

\*ER <cr>

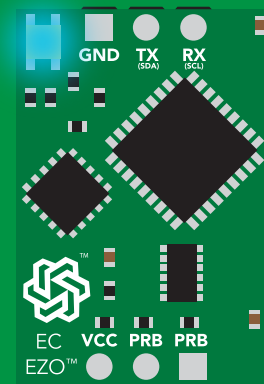
I2C,100



Green  
\*OK <cr>



(reboot)



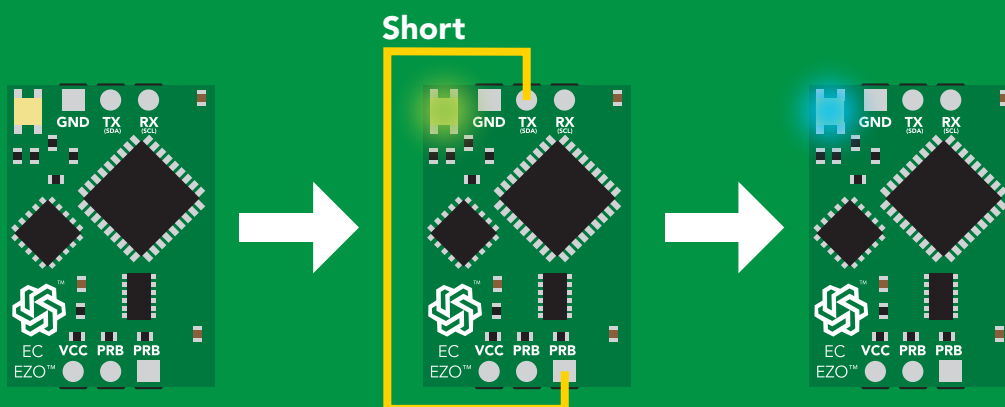
Blue  
now in I<sup>2</sup>C mode

# Manual switching to I<sup>2</sup>C

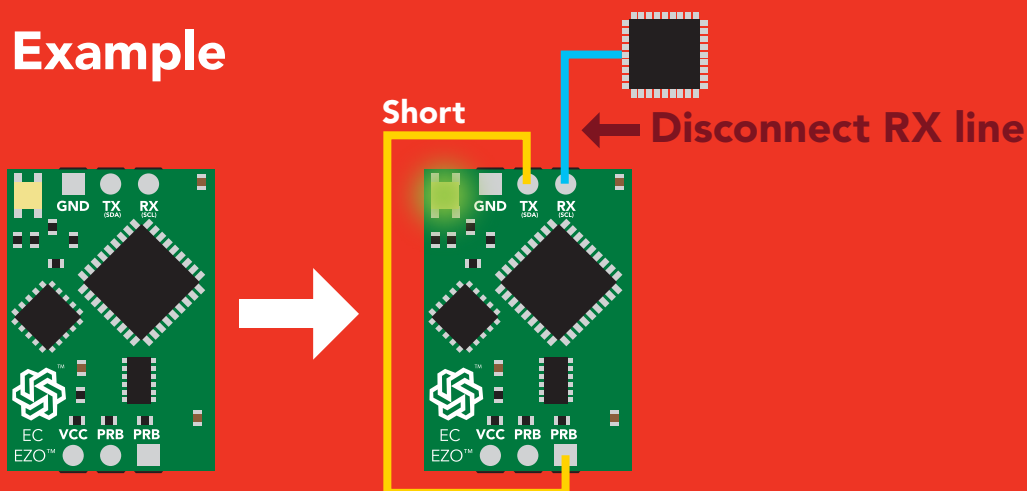
- Disconnect ground (power off)
- Disconnect TX and RX
- Connect TX to the right PRB
- Confirm RX is disconnected
- Connect ground (power on)
- Wait for LED to change from **Green** to **Blue**
- Disconnect ground (power off)
- Reconnect all data and power

Manually switching to I<sup>2</sup>C will set the I<sup>2</sup>C address to 100 (0x64)

## Example



## Wrong Example



# I<sup>2</sup>C mode

The I<sup>2</sup>C protocol is **considerably more complex** than the UART (RS-232) protocol. Atlas Scientific assumes the embedded systems engineer understands this protocol.

To set your EZO™ device into I<sup>2</sup>C mode click [here](#)

## Settings that are retained if power is cut

- Calibration
- Change I<sup>2</sup>C address
- Enable/disable parameters
- Hardware switch to UART mode
- LED control
- Protocol lock
- Software switch to UART mode

## Settings that are **NOT** retained if power is cut

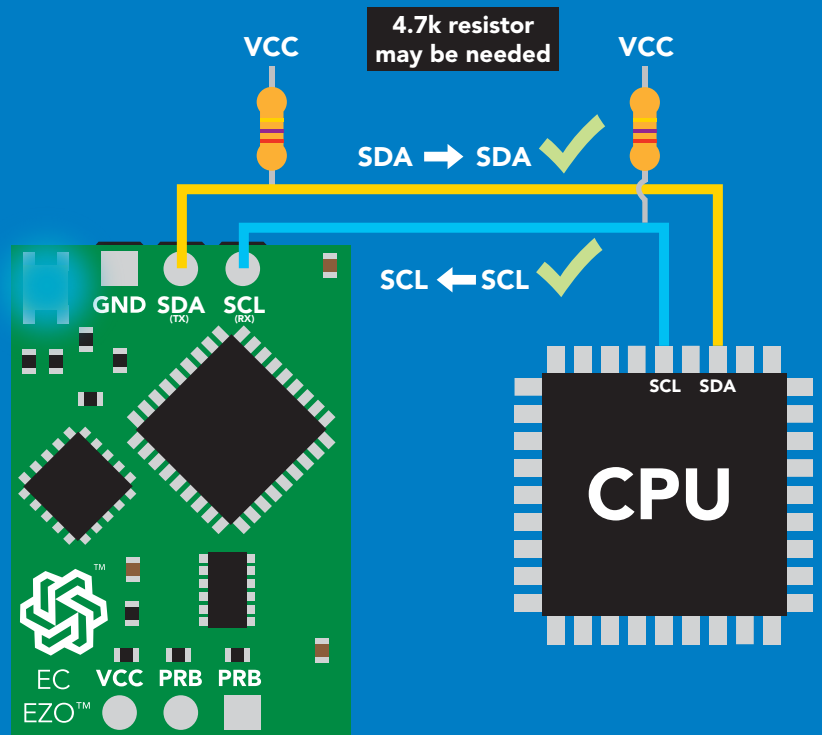
- Find
- Sleep mode
- Temperature compensation

# I<sup>2</sup>C mode

I<sup>2</sup>C address (0x01 – 0x7F)  
**100 (0x64) default**

V<sub>CC</sub> 3.3V – 5.5V

Clock speed 100 – 400 kHz



## Data format

### Reading

Conductivity = **Default**

Total dissolved solids  
Salinity  
Specific gravity } = Must be enabled

Order **EC, TDS, SAL, SG**

Encoding **ASCII**

Format

string

Data type

floating point

Decimal places

3

Smallest string

3 characters

Largest string

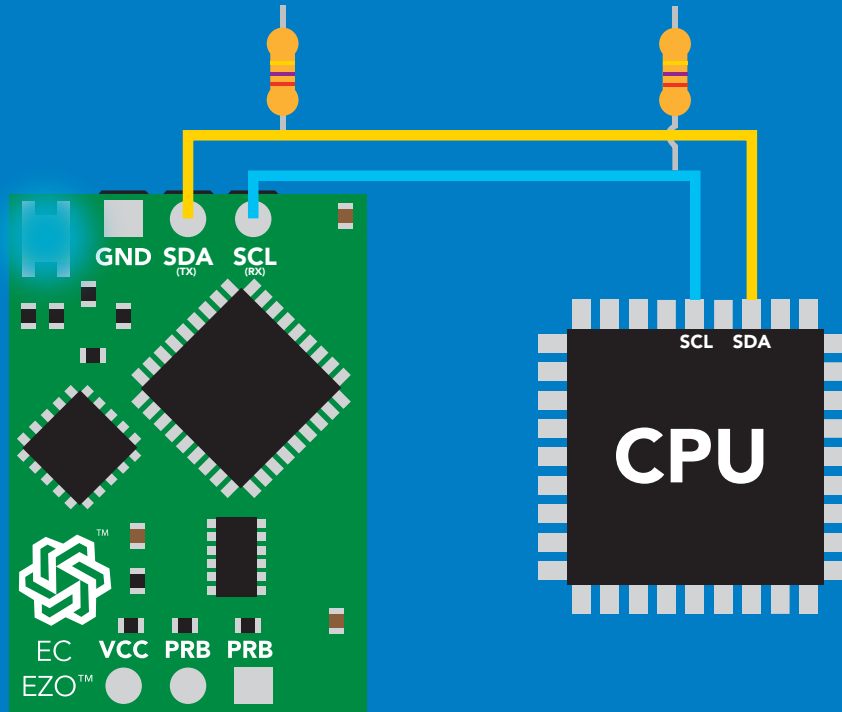
40 characters

# Sending commands to device

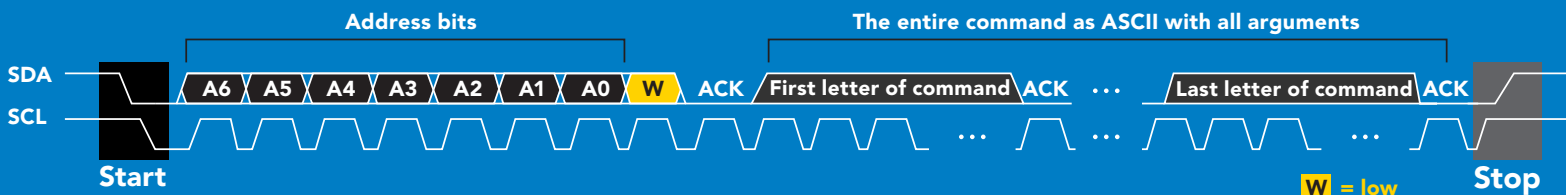
5 parts



## Example



## Advanced

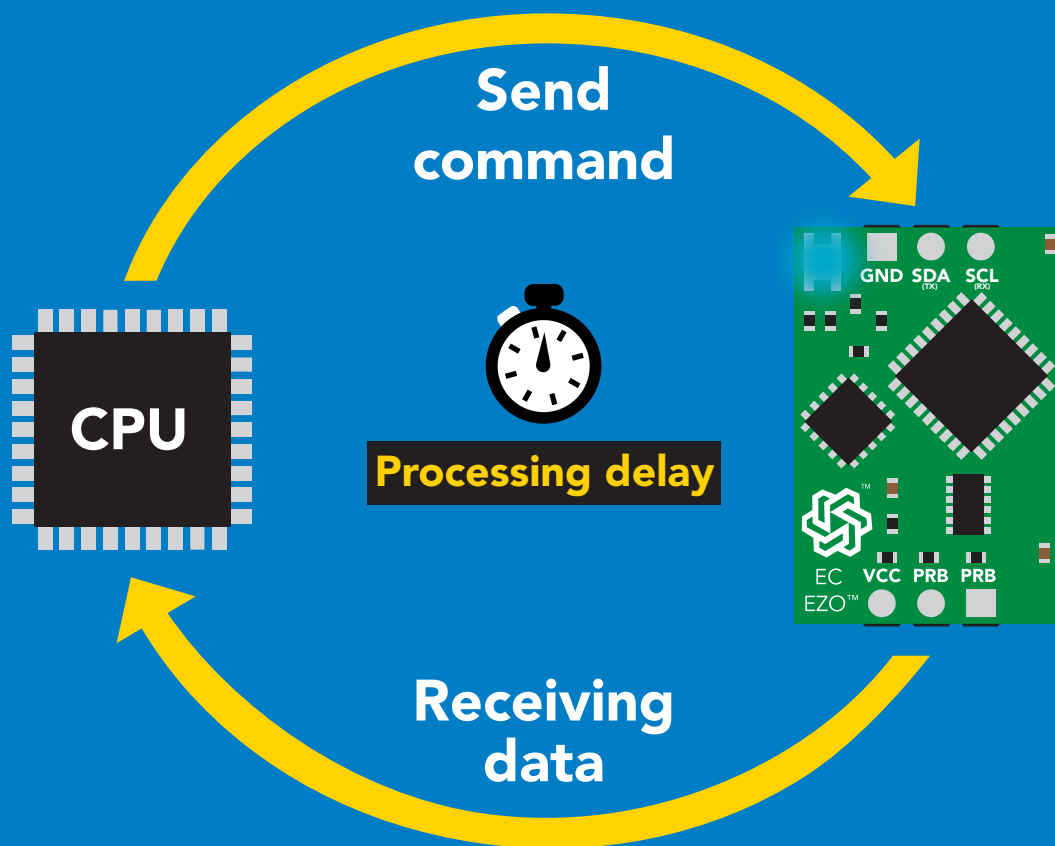




# Response codes

After a command has been issued, a 1 byte response code can be read in order to confirm that the command was processed successfully.

*Reading back the response code is completely optional, and is not required for normal operation.*



## Example

```
I2C_start;  
I2C_address;  
I2C_write(EZO_command);  
I2C_stop;
```

```
delay(300);
```



```
Processing delay
```

```
I2C_start;  
I2C_address;  
Char[ ] = I2C_read;  
I2C_stop;
```

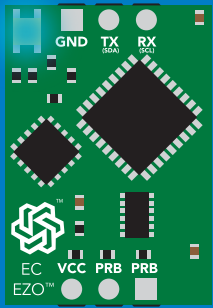
The response code will always be 254, if you do not wait for the processing delay.

### Response codes

Single byte, not string

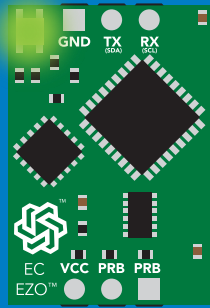
255	no data to send
254	still processing, not ready
2	syntax error
1	successful request

# LED color definition



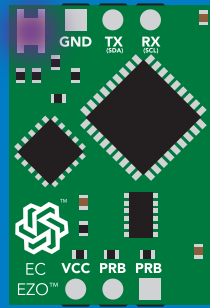
Blue

I<sup>2</sup>C standby



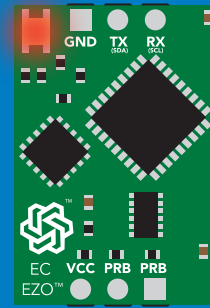
Green

Taking reading



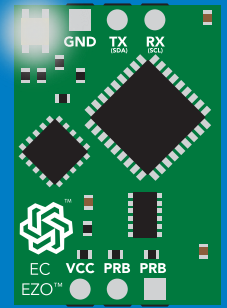
Purple

Changing  
I<sup>2</sup>C address



Red

Command  
not understood



White

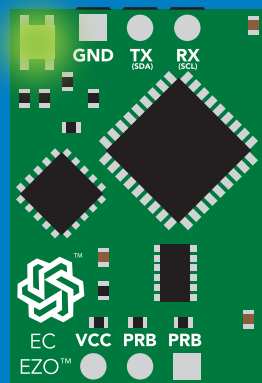
Find

5V

LED ON  
+2.5 mA

3.3V

+1 mA



Solid Green LED

in UART mode  
Not I<sup>2</sup>C ready

# I<sup>2</sup>C mode

## command quick reference

All commands are ASCII strings or single ASCII characters.

<b>Command</b>	<b>Function</b>	
<b>Baud</b>	switch back to UART mode	<b>pg. 63</b>
<b>Cal</b>	performs calibration	<b>pg. 49</b>
<b>Export</b>	export calibration	<b>pg. 51</b>
<b>Factory</b>	enable factory reset	<b>pg. 62</b>
<b>Find</b>	finds device with blinking white LED	<b>pg. 47</b>
<b>i</b>	device information	<b>pg. 57</b>
<b>I2C</b>	change I <sup>2</sup> C address	<b>pg. 61</b>
<b>Import</b>	import calibration	<b>pg. 52</b>
<b>K</b>	set probe type	<b>pg. 53</b>
<b>L</b>	enable/disable LED	<b>pg. 46</b>
<b>Name</b>	set/show name of device	<b>pg. 56</b>
<b>O</b>	enable/disable parameters	<b>pg. 55</b>
<b>Plock</b>	enable/disable protocol lock	<b>pg. 60</b>
<b>R</b>	returns a single reading	<b>pg. 48</b>
<b>Sleep</b>	enter sleep mode/low power	<b>pg. 59</b>
<b>Status</b>	retrieve status information	<b>pg. 58</b>
<b>T</b>	temperature compensation	<b>pg. 54</b>
<b>TDS</b>	change the TDS conversion factor	<b>pg. 50</b>

# LED control

## Command syntax

300ms  processing delay

L,1 LED on **default**

L,0 LED off

L,? LED state on/off?

## Example

## Response

L,1

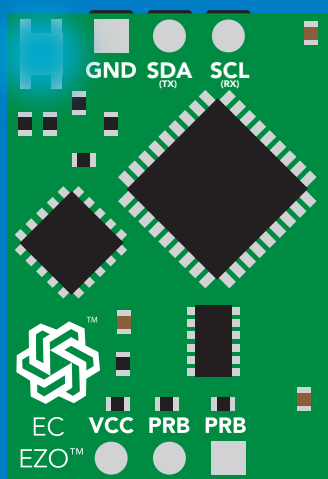
  
**Wait 300ms** **1** **0**  
Dec Null

L,0

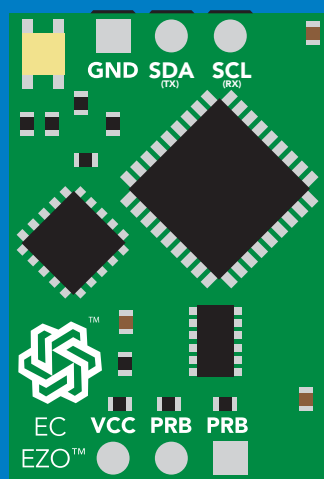
  
**Wait 300ms** **1** **0**  
Dec Null

L,?

  
**Wait 300ms** **1** **?L,1** **0** or **1** **?L,0** **0**  
Dec ASCII Null Dec ASCII Null



L,1



L,0

# Find

300ms  processing delay

## Command syntax

This command will disable continuous mode  
Send any character or command to terminate find.

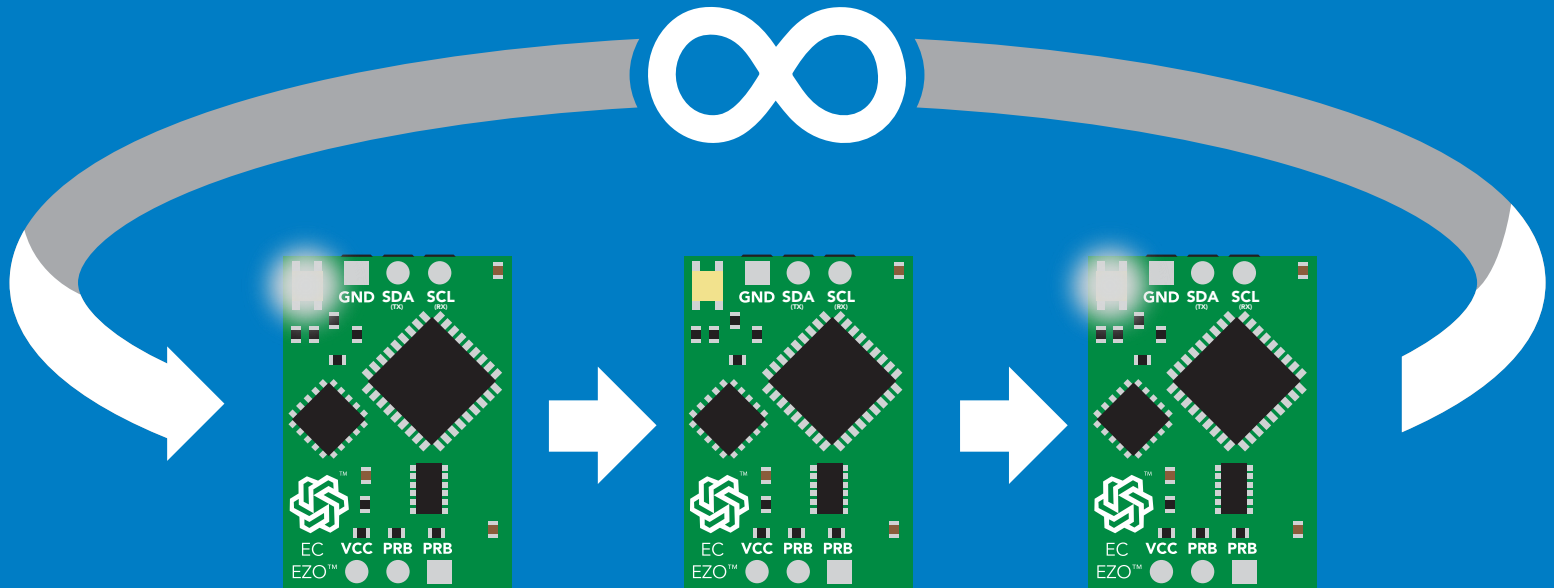
Find LED rapidly blinks white, used to help find device

## Example

## Response

Find

 Wait 300ms  
1 Dec 0 Null



# Taking reading

## Command syntax

600ms  processing delay

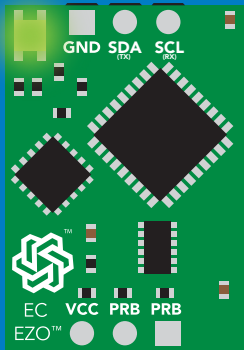
R return 1 reading

## Example

R

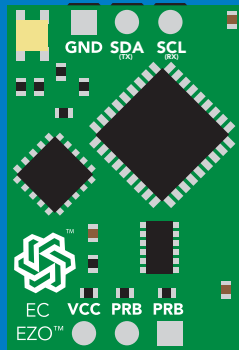
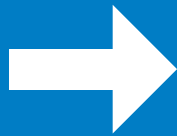
 Wait 600ms

<b>1</b>	<b>1,413</b>	<b>0</b>
Dec	ASCII	Null

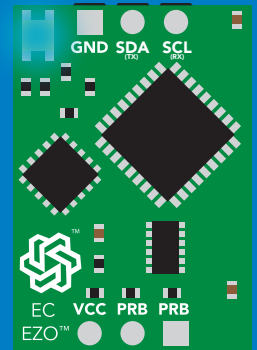
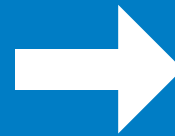


Green

Taking reading



Transmitting



Blue

Standby

# Calibration

600ms  processing delay

## Command syntax

Dry calibration must always be done first!

Cal,dry	dry calibration
Cal,n	single point calibration, where n = any value
Cal,low,n	low end calibration, where n = any value
Cal,high,n	high end calibration, where n = any value
Cal,clear	delete calibration data
Cal,?	device calibrated?

## Example

## Response

Cal,dry

 **Wait 600ms** **1** **0**  
Dec Null

Cal,84

 **Wait 600ms** **1** **0**  
Dec Null

Cal,low,12880

 **Wait 600ms** **1** **0**  
Dec Null


Cal,high,80000

 **Wait 600ms** **1** **0**  
Dec Null

Cal,clear

 **Wait 300ms** **1** **0**  
Dec Null

Cal,?

 **Wait 300ms** **1** **?CAL,0** **0** or **1** **?CAL,1** **0** or **1** **?CAL,2** **0**  
Dec ASCII Null Dec ASCII Null Dec ASCII Null  
one point two point

### One point calibration:

Step 1. "cal,dry"

Step 2. "cal,n"

**Calibration complete!**

### Two point calibration:

Step 1 "cal,dry"

Step 2 "cal,low,n"

Step 3 "cal,high,n"

**Calibration complete!**

# Changing the TDS (ppm) conversion factor

300ms  processing delay

There are several different conversion factors used to read TDS(ppm). For some applications, it may be necessary to use a conversion factor other than the default value of 0.54

## Command syntax

**TDS,n** set custom conversion factor, n = any value between 0.01 – 1.00  
**TDS,?** conversion factor being used


## Example

## Response

**TDS,?**

 Wait 300ms **1** **?TDS,0.54** **0**  
 Dec ASCII Null


**R**

 Wait 300ms **1** **100,54** **0**  
 Dec ASCII Null  
 EC TDS  
 ↓ ↓

**TDS,0.46**

 Wait 300ms **1** **0**  
 Dec Null

**R**

 Wait 300ms **1** **100,46** **0**  
 Dec ASCII Null  
 EC TDS  
 ↓ ↓

## Common conversion factors

NaCl 0.47 – 0.50  
 KCL 0.50 - 0.57  
 "442" 0.65 – 0.85

## Formula

EC x conversion factor = TDS

# Export calibration

300ms  processing delay

## Command syntax

Export: Use this command to download calibration settings

Export,? calibration string info

Export export calibration string from calibrated device

## Example

## Response

Export,?



Wait 300ms

1

Dec

10,120

ASCII

0

Null

### Response breakdown

10, 120

# of strings to export # of bytes to export

Export strings can be up to 12 characters long

Export



Wait 300ms

1

Dec

59 6F 75 20 61 72

ASCII

0

Null

(1 of 10)

Export



Wait 300ms

1

Dec

65 20 61 20 63 6F

ASCII

0

Null

(2 of 10)

(7 more)

⋮

Export



Wait 300ms

1

Dec

6F 6C 20 67 75 79

ASCII

0

Null

(10 of 10)

Export



Wait 300ms

1

Dec

\*DONE

ASCII

0

Null

# Import calibration

300ms  processing delay

## Command syntax

Import: Use this command to upload calibration settings to one or more devices.

Import,n import calibration string to new device

## Example

Import, 59 6F 75 20 61 72 (1 of 10)

Import, 65 20 61 20 63 6F (2 of 10)

⋮

Import, 6F 6C 20 67 75 79 (10 of 10)

## Response

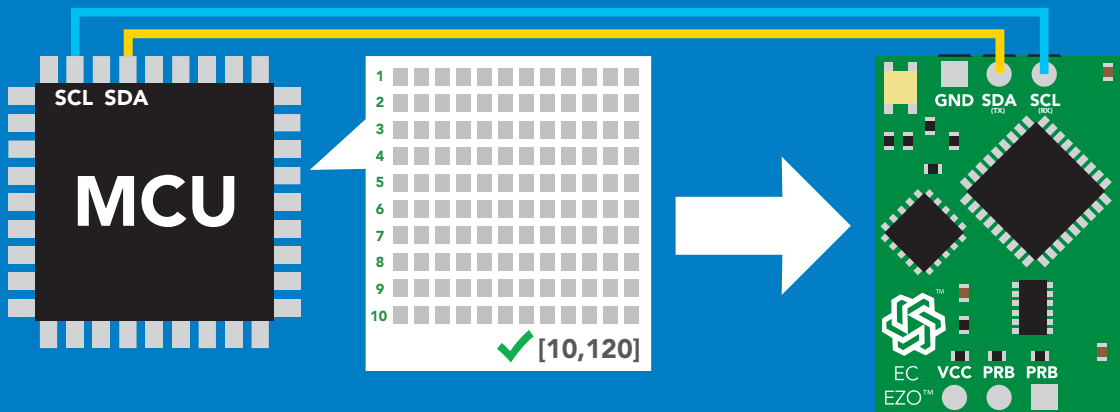
 **1** **0**  
Wait 300ms Dec Null

 **1** **0**  
Wait 300ms Dec Null

⋮

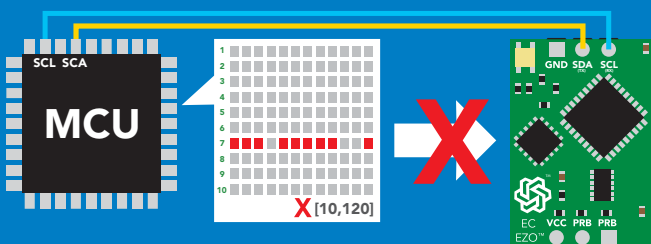
 **1** **0**  
Wait 300ms Dec Null

Import,n



**1** **\*Pending** **0**  
Dec ASCII Null

system will reboot



reboot

\* If one of the imported strings is not correctly entered, the device will not accept the import and reboot.

# Setting the probe type

## Command syntax

300ms  processing delay

K,n n = any value; floating point in ASCII

K 1.0 is the default value

K,? probe K value?

## Example

## Response

K,10

 Wait 300ms

1	0
Dec	Null

K,?

 Wait 600ms

1	K,10	0
Dec	ASCII	Null



K 0.1



K 1.0



K 10

# Temperature compensation

## Command syntax

Default temperature = 25°C  
Temperature is always in Celsius  
Temperature is not retained if power is cut

**T,n** n = any value; floating point or int    300ms  processing delay  
**T,?** compensated temperature value?  
**RT,n** set temperature compensation and take a reading

## Example

## Response

**T,19.5**

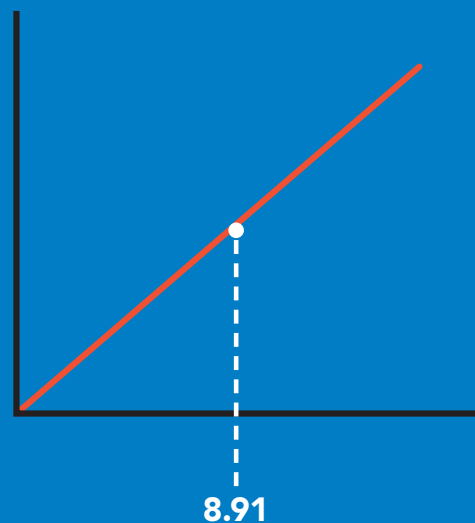
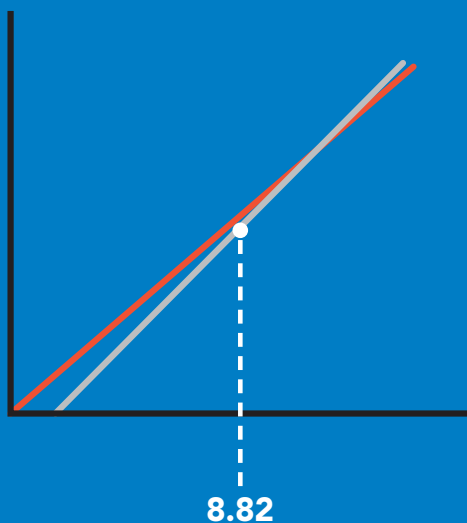
 **Wait 300ms**    **1** **0**  
Dec    Null

**RT,19.5**

 **Wait 900ms**    **1** **8.91** **0**  
Dec    ASCII    Null

**T,?**

 **Wait 300ms**    **1** **?T,19.5** **0**  
Dec    ASCII    Null



# Enable/disable parameters from output string

## Command syntax


300ms  processing delay

O, [parameter],[1,0]      enable or disable output parameter  
O,?      enabled parameter?

## Example

## Response

O,EC,1 / O,EC,0

 **1** **0**      enable / disable conductivity  
Wait 300ms      Dec      Null

O,TDS,1 / O,TDS,0

 **1** **0**      enable / disable total dissolved solids  
Wait 300ms      Dec      Null

O,S,1 / O,S,0

 **1** **0**      enable / disable salinity  
Wait 300ms      Dec      Null

O,SG,1 / O,SG,0

 **1** **0**      enable / disable specific gravity  
Wait 300ms      Dec      Null

O,?

 **1** **?O,EC,TDS,S,SG** **0**      if all are enabled  
Wait 300ms      Dec      ASCII      Null

## Parameters

EC      Conductivity =  $\mu\text{S/cm}$   
TDS      Total dissolved solids = ppm  
S      Salinity = PSU (ppt) 0.00 – 42.00  
SG      Specific gravity (sea water only) = 1.00 – 1.300

## Followed by 1 or 0

1      enabled  
0      disabled

\* If you disable all possible data types your readings will display "no output".

# Naming device

300ms  processing delay

## Command syntax

Do not use spaces in the name

Name,n	set name	n =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Name,	clears name																		
Name,?	show name																		

Up to 16 ASCII characters

## Example

## Response

Name,



1 0  
Dec Null

name has been cleared

Name,zzt



1 0  
Dec Null

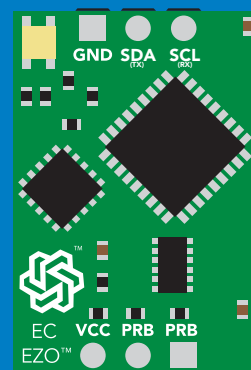
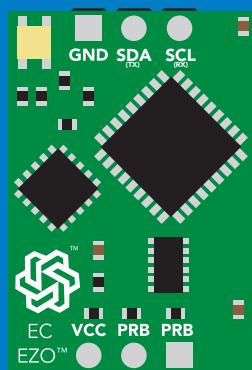
Name,?



1 ?Name,zzt 0  
Dec ASCII Null

Name,zzt

Name,?



1 0

1 ?Name,zzt 0

# Device information

## Command syntax

300ms  processing delay

i device information

## Example

i

## Response



Wait 300ms

1

Dec

?i,EC, 2.16

ASCII

0

Null

## Response breakdown

?i, EC, 2.16  
↑     ↑  
Device Firmware

# Reading device status

Command syntax

300ms  processing delay

Status voltage at Vcc pin and reason for last restart

## Example

## Response

Status

 **1** **?Status,P,5.038** **0**  
Wait 300ms Dec ASCII Null

## Response breakdown

**?Status,** **P,** **5.038**  
Reason for restart Voltage at Vcc

### Restart codes

**P** powered off  
**S** software reset  
**B** brown out  
**W** watchdog  
**U** unknown

# Sleep mode/low power

## Command syntax

**Sleep** enter sleep mode/low power

Send any character or command to awaken device.

### Example

### Response

**Sleep**

**no response**

Do not read status byte after issuing sleep command.

**Any command**

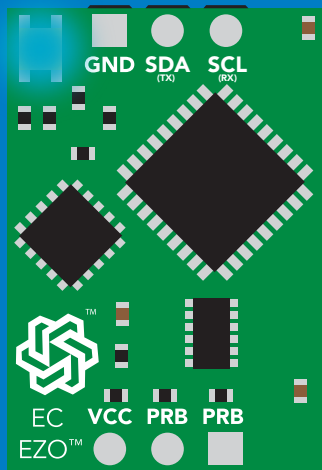
**wakes up device**

**5V**

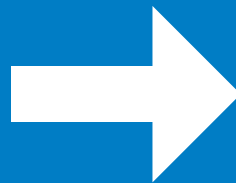
STANDBY	SLEEP
<b>18.14 mA</b>	<b>0.7 mA</b>

**3.3V**

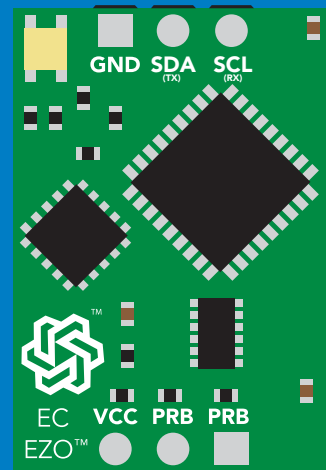
<b>16.85 mA</b>	<b>0.4 mA</b>
-----------------	---------------



**Standby**



**Sleep**



**Sleep**

# Protocol lock

## Command syntax

300ms  processing delay

Plock,1 enable Plock

Plock,0 disable Plock

Plock,? Plock on/off?

Locks device to I<sup>2</sup>C mode.

default

## Example

## Response


Plock,1

 Wait 300ms  
1 0  
Dec Null

Plock,0

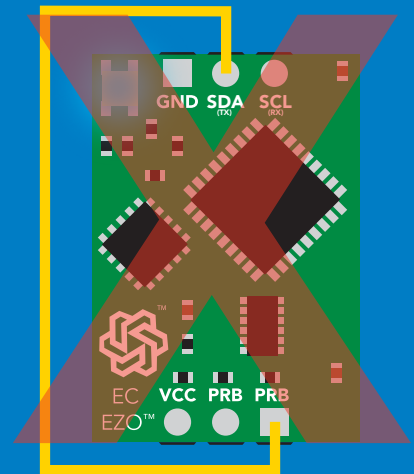
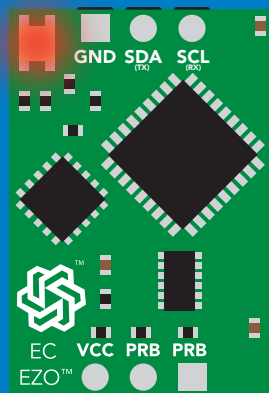
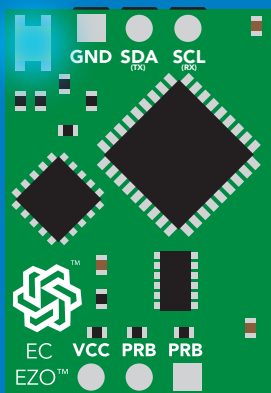
 Wait 300ms  
1 0  
Dec Null

Plock,?

 Wait 300ms  
1 ?Plock,1 0  
Dec ASCII Null

Plock,1

Baud, 9600



cannot change to UART

cannot change to UART

# I<sup>2</sup>C address change

Command syntax

300ms  processing delay

I2C,n sets I<sup>2</sup>C address and reboots into I<sup>2</sup>C mode

Example

Response

I2C,101

device reboot  
(no response given)

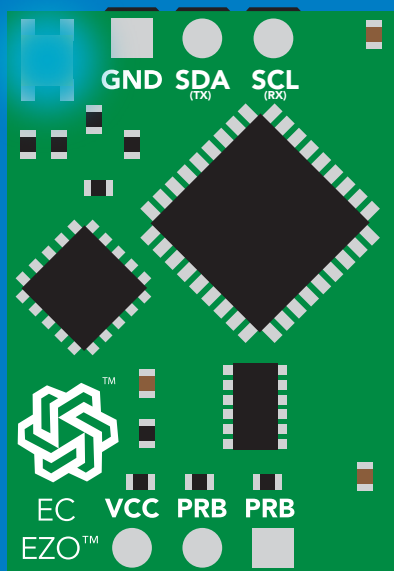
## Warning!

Changing the I<sup>2</sup>C address will prevent communication between the circuit and the CPU until your CPU is updated with the new I<sup>2</sup>C address.

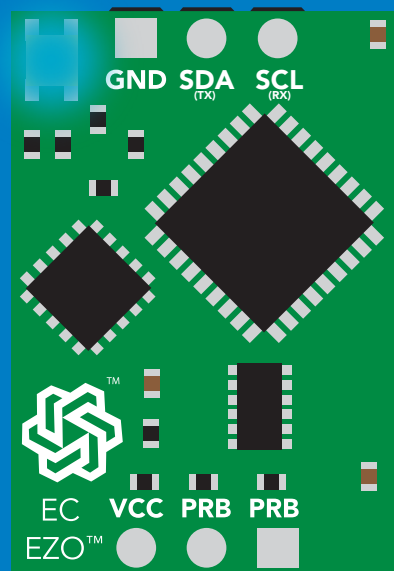
Default I<sup>2</sup>C address is 100 (0x64).

n = any number 1 – 127

I2C,101



(reboot)



# Factory reset

## Command syntax

Factory reset will not take the device out of I<sup>2</sup>C mode.

Factory enable factory reset

I<sup>2</sup>C address will not change

## Example

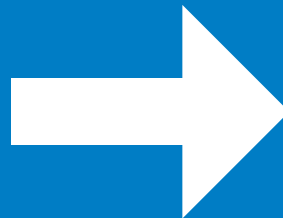
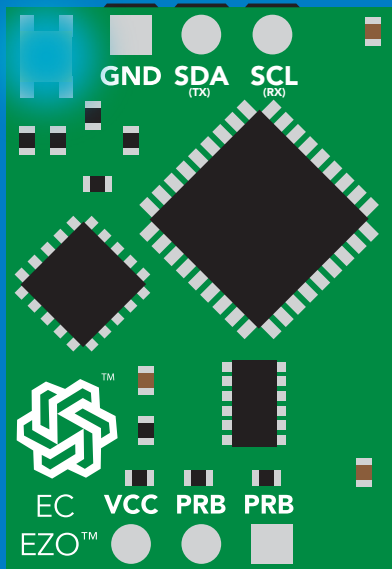
## Response

Factory

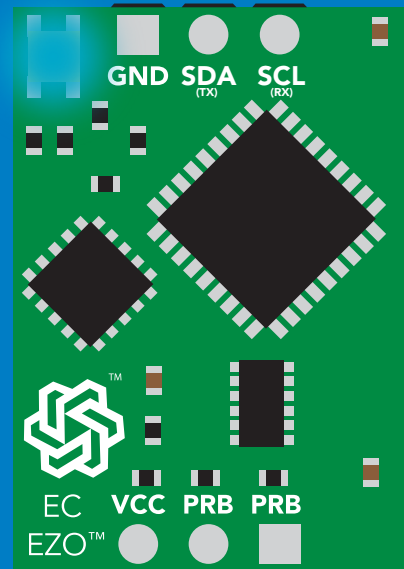
device reboot  
(no response given)

Clears calibration  
LED on  
Response codes enabled

## Factory



(reboot)



# Change to UART mode

## Command syntax

Baud,n switch from I<sup>2</sup>C to UART

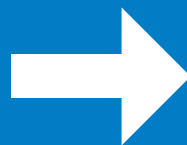
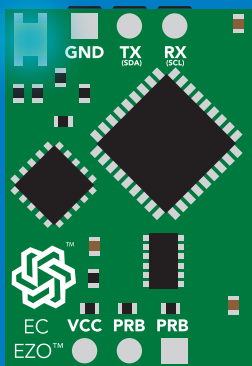
### Example

Baud,9600

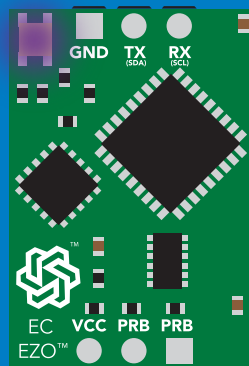
### Response

reboot in UART mode  
(no response given)

n = [ 300  
1200  
2400  
9600  
19200  
38400  
57600  
115200



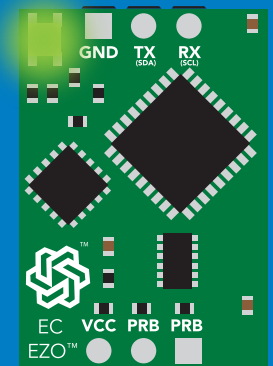
Baud,9600



Changing to  
UART mode



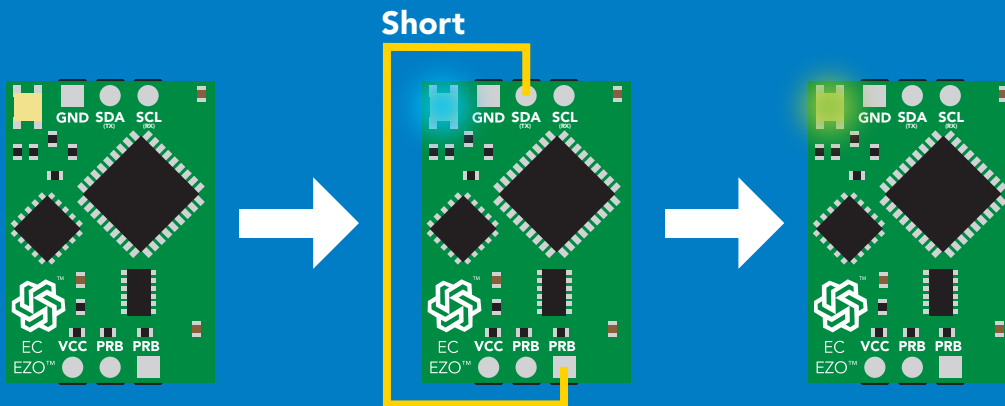
(reboot)



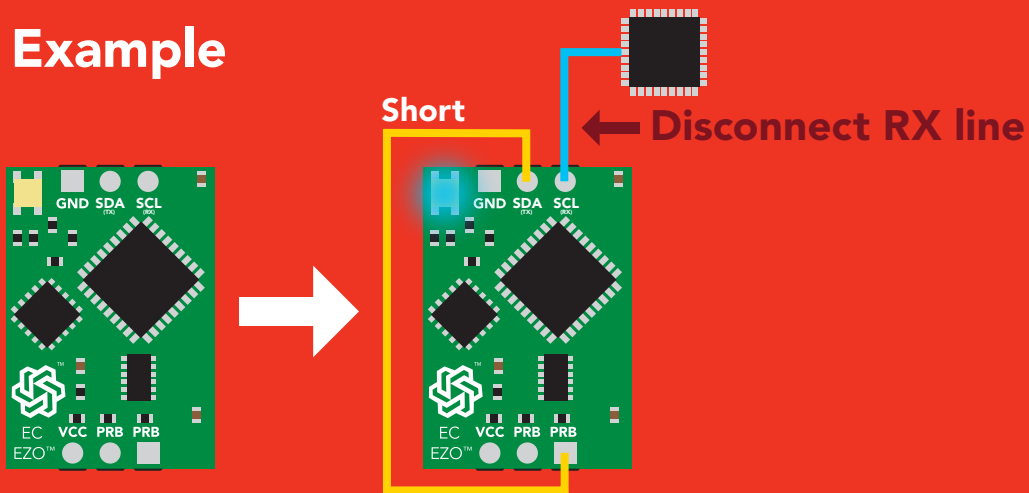
# Manual switching to UART

- Disconnect ground (power off)
- Disconnect TX and RX
- Connect TX to the right PRB
- Confirm RX is disconnected
- Connect ground (power on)
- Wait for LED to change from Blue to Green
- Disconnect ground (power off)
- Reconnect all data and power

## Example



## Wrong Example



# Calibration theory

The accuracy of your readings is directly related to the quality of your calibration. (Calibration is not difficult, and a little bit of care goes a long way)

A properly calibrated conductivity probe will never need recalibration. Once calibrated, you can use the probe continuously year after year without concern. This is because a conductivity probe does not contain any parts that wear out over time.

However, changing the cable length of the probe or moving the EZO-EC circuit from one machine to another may require recalibration. This is because such actions will change the electrical properties of the probe or EC circuit.



# Two point or Three point calibration

## No calibration



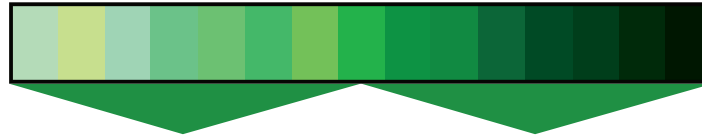
Approximation

## Single point calibration



Narrow band accuracy

## Two point calibration

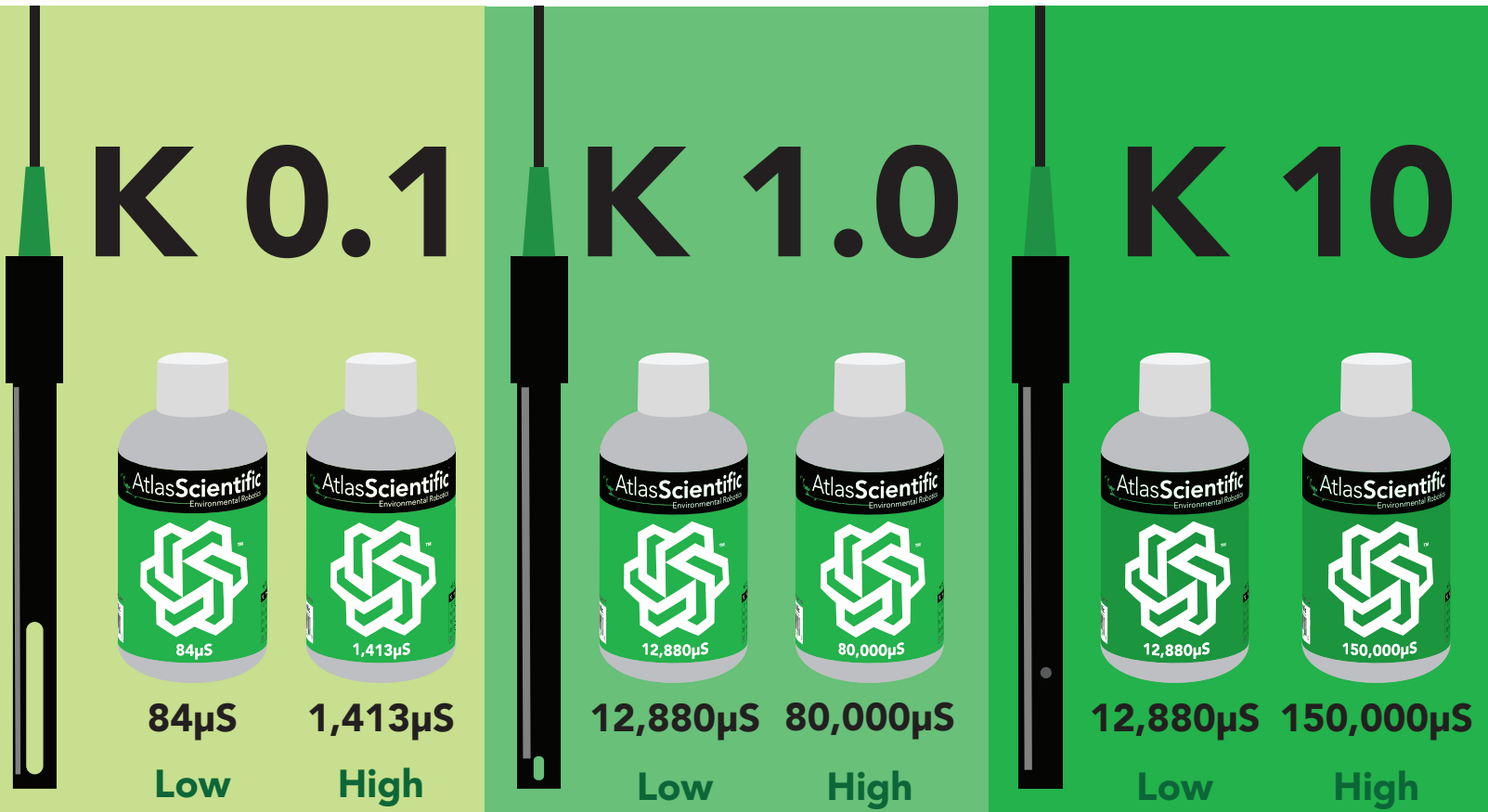


Low point

High point

Wide range accuracy

# Recommended calibration points

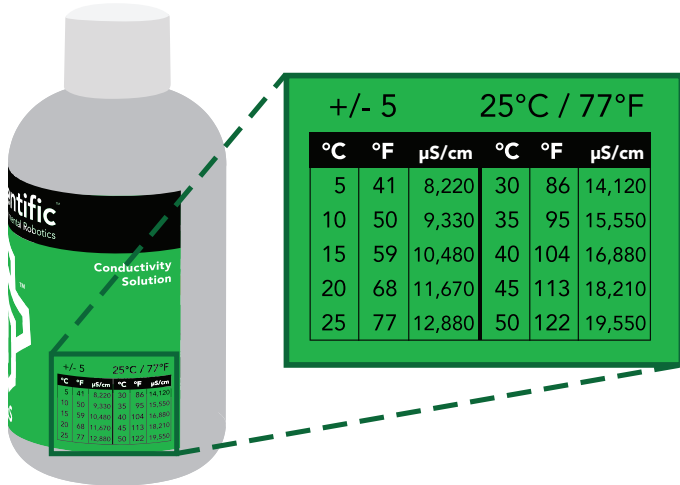


When calibrating, Atlas Scientific recommends using the above  $\mu\text{S}$  values. However, you can use any  $\mu\text{S}$  values you want.

# Temperature compensation during calibration

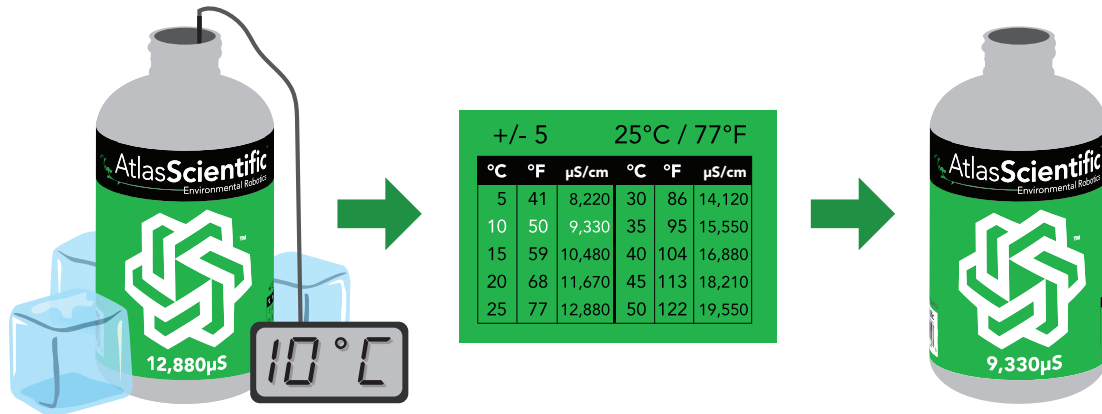
Temperature has a significant effect on conductivity readings. The EZO™ Conductivity circuit has its temperature compensation set to 25° C as the default. **At no point should you change the default temperature compensation during calibration.**

If the solution is +/- 5° C (or more), refer to the chart on the bottle, and calibrate to that value.



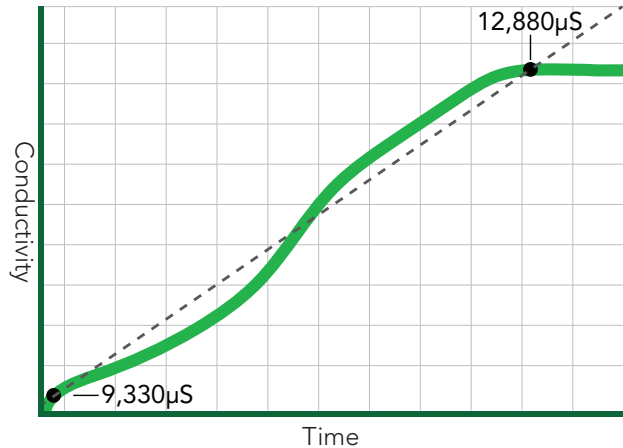
## Temperature compensation example

For this example, we brought the temperature of the solution down to 10° C. Referring to chart on the bottle, you can see the value you should calibrate to is **9,330µS**.



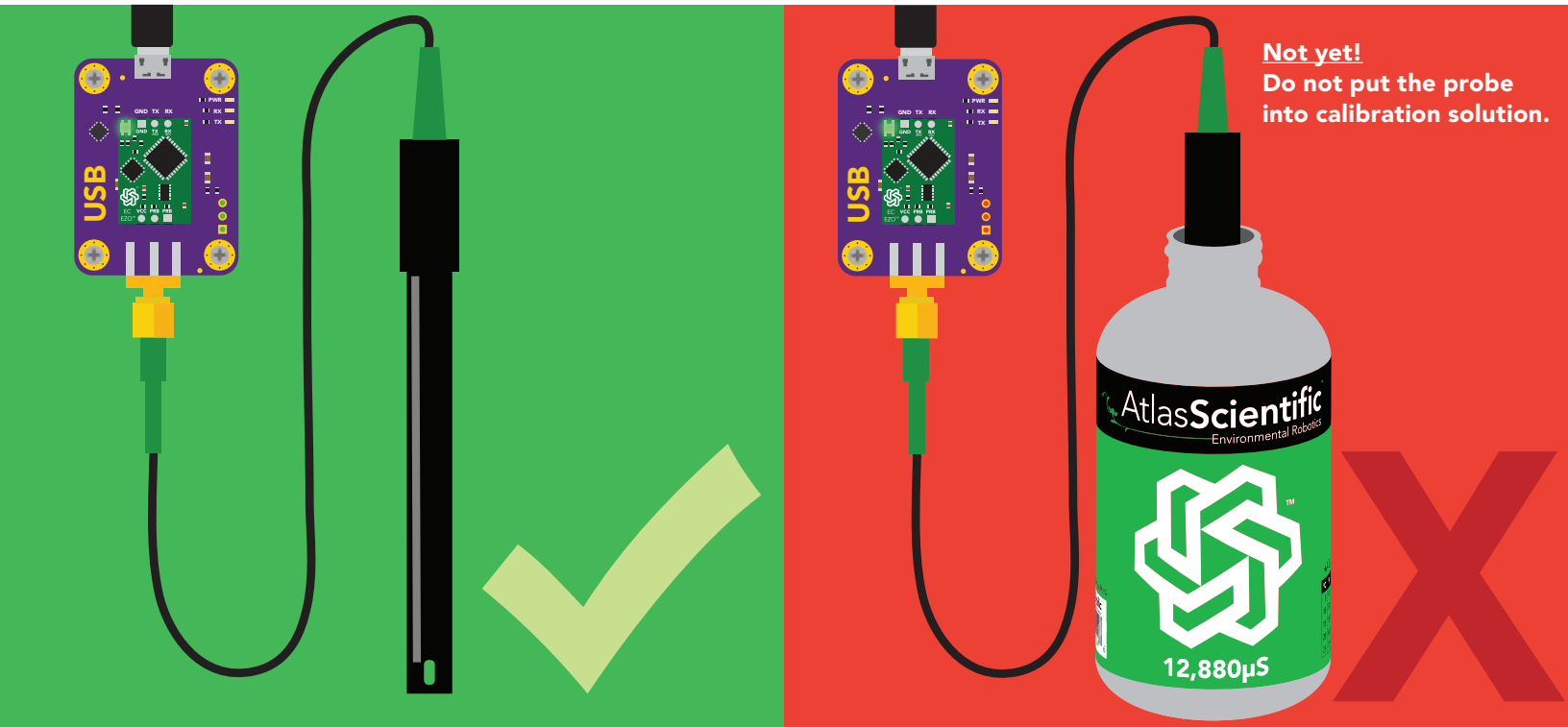
Over time, the readings will normalize as the solution warms to 25° C.

See pages 27 or 54 for more information.



# 1. Pre-calibration setup

Connect the dry conductivity probe and take continuous readings.



# 2. Set probe type

If your probe  $\neq$  K 1.0 (default), then set the probe type by using the "**K,n**" command. (where  $n = K$  value of your probe) for more information, see page 26 or 53.

# 3. Dry calibration

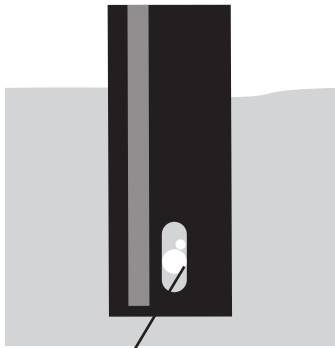
Perform a dry calibration using the command "**Cal,dry**". Even though you may see readings of 0.00 before issuing the "**Cal,dry**" command, it is still a necessary part of calibration.

00.00 → "**Cal,dry**" → 0.00 ✓ Correct

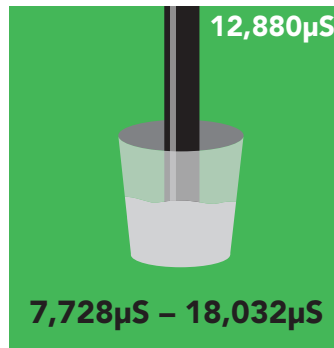
17.00 → "**Cal,dry**" → 0.00 ✓ Also correct

## Two point calibration - low point

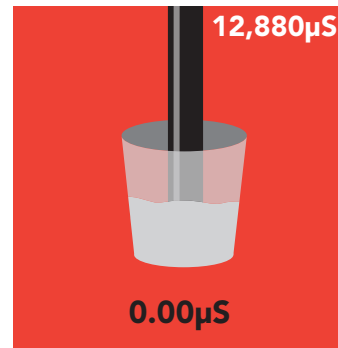
Pour a small amount of the low point calibration solution into a cup. Shake the probe to make sure you do not have trapped air bubbles in the sensing area. You should see readings that are off by **1 – 40%** from the stated value of the calibration solution. Wait for readings to stabilize (*small movement from one reading to the next is normal*).



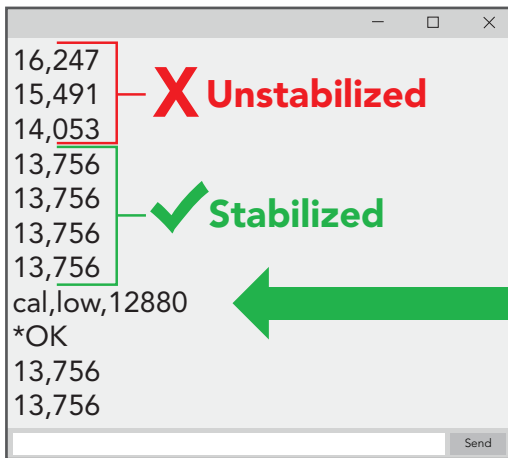
Trapped air in sensing area (shake to remove)



+/- 40%



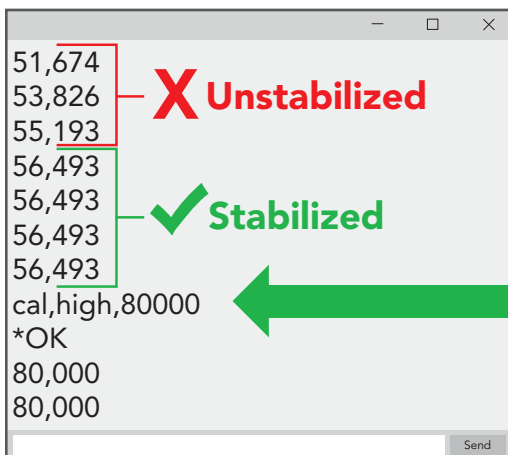
check probe connection, you cannot calibrate to 0.



Once the readings stabilize, issue the low point calibration command. "**cal,low,12880**"  
(Readings will **NOT** change)

## Two point calibration - high point

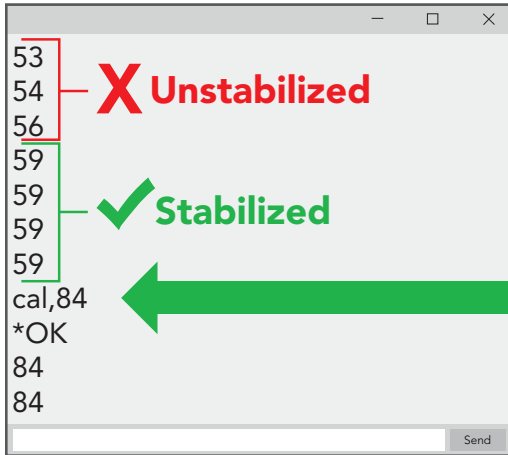
- Rinse off the probe before calibrating to the high point.
- Pour a small amount of the high point calibration solution into a cup.
- Shake the probe to remove trapped air.
- Readings may be off by +/- 40%
- Wait for readings to stabilize.



Once the readings stabilize, issue the high point calibration command. "**cal,high,80000**"  
(Readings **will** change, calibration complete).

# Single point calibration

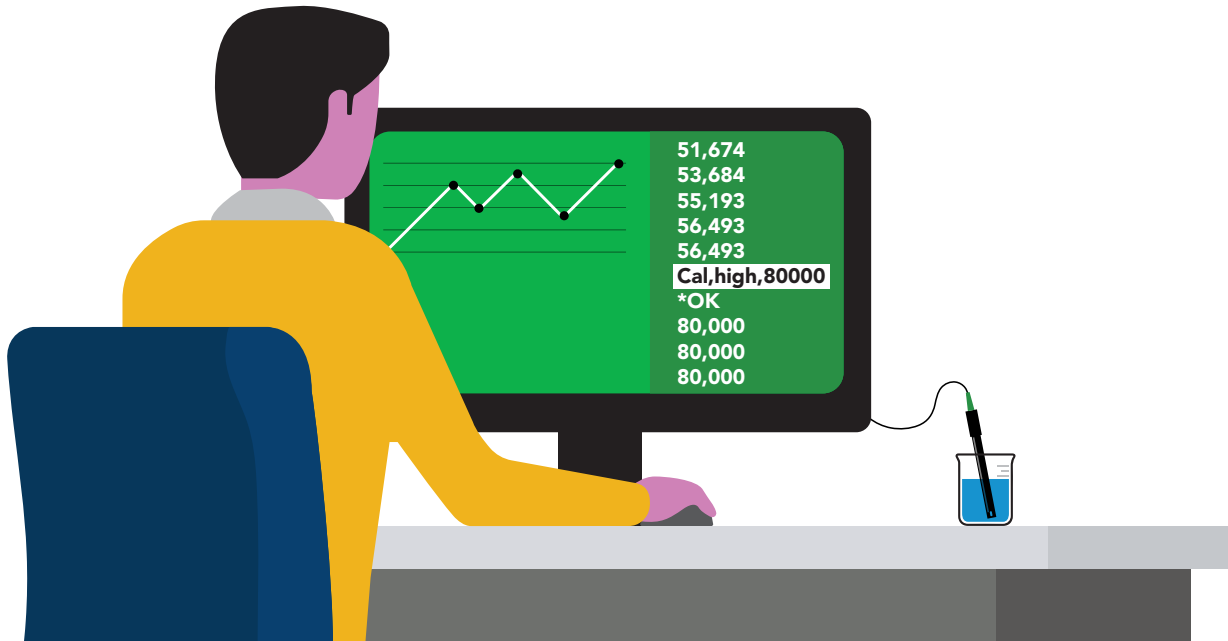
- Pour a small amount of calibration solution into a cup ( $\mu S$  value of your choice).
- Shake the probe to remove trapped air.
- Readings may be off by +/- 40%
- Wait for readings to stabilize.



Once the readings stabilize, issue the single point calibration command "**cal,n**" where n = any value. (Readings **will** change, calibration complete).a

# Best practices for calibration

Always watch the readings throughout the calibration process.  
Issue calibration commands once the readings have stabilized.



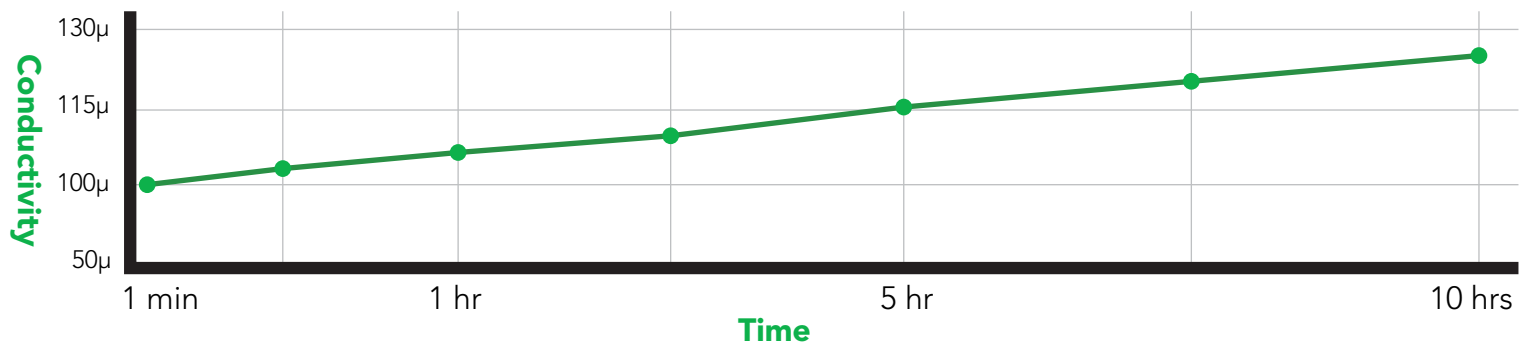
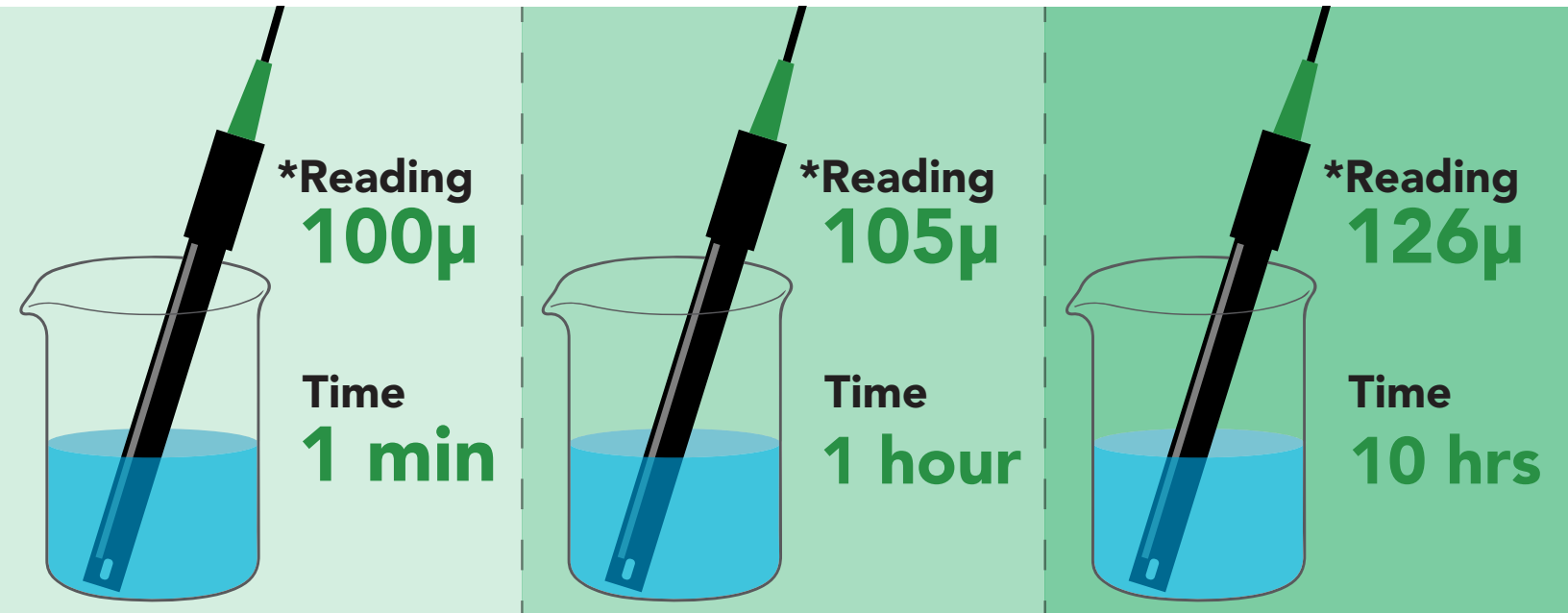
**⚠ Never do a blind calibration! ⚠**

Issuing a calibration command before the readings stabilize will result in drifting readings.



# Long-term conductivity measurements in stagnant water

Taking continuous conductivity readings in stagnant water:



A small amount of energy must be put into the water to measure conductivity. This small amount of energy will start to affect the readings in stagnant water. Over time, the energy passing through the stagnant water will start to align the dissolved salts along a path of least resistance. Lowering the resistance of the water will increase the water's conductivity.

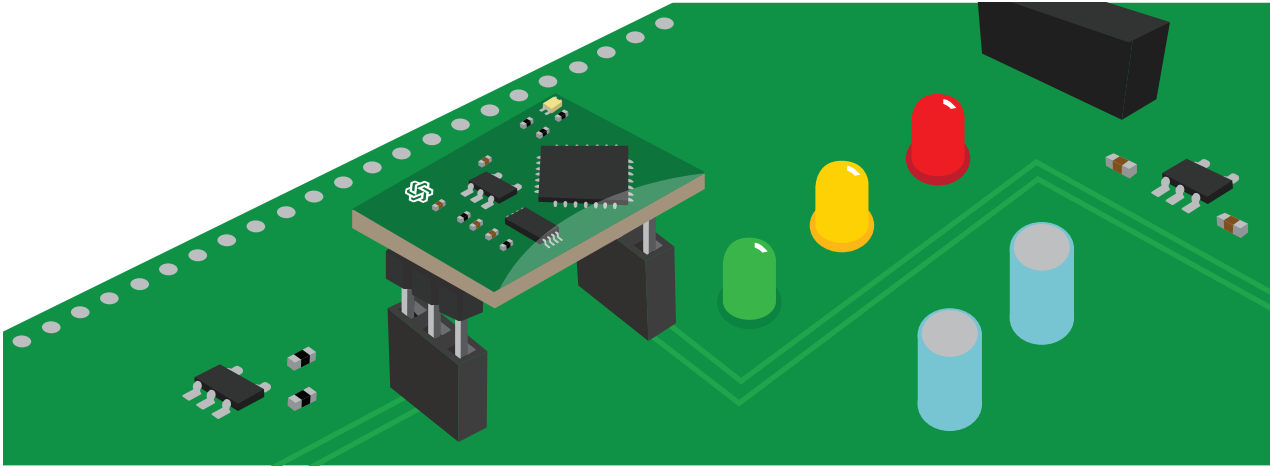
Moving the probe or the water will disrupt this alignment and cause the readings to suddenly return to normal.

***\*These are example readings; there is no way to predict how the readings will change over time.***

# Soldering

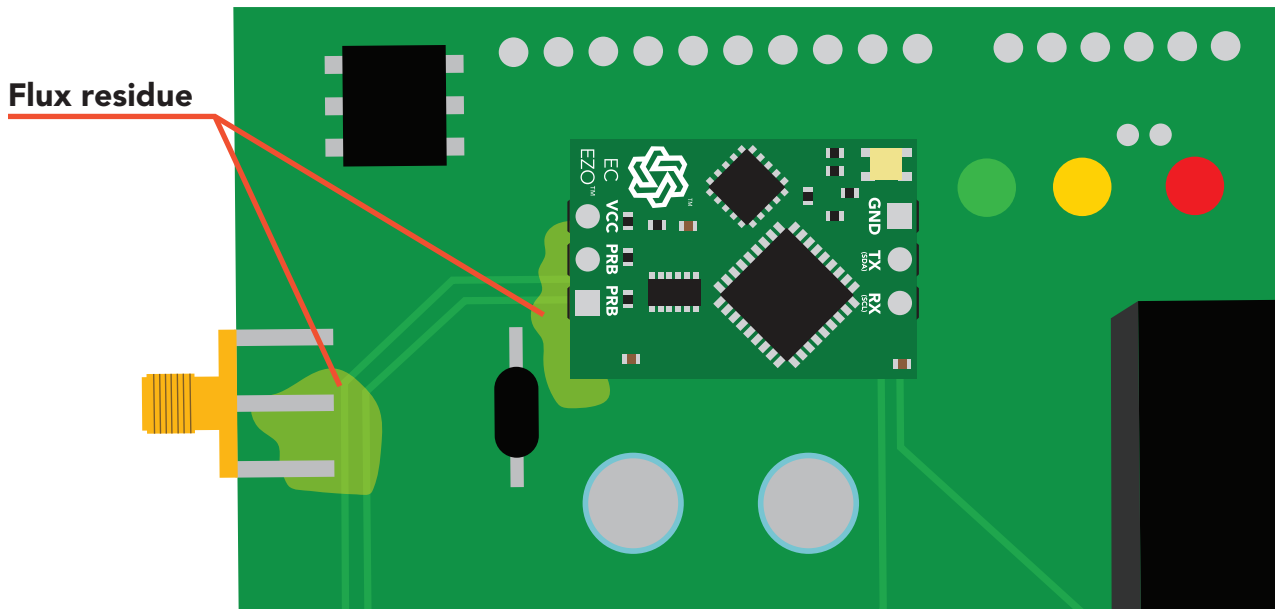
**Do not directly solder an EZO circuit to your PCB.** If something goes wrong during the soldering process it may become impossible to correct the problem. It is simply not worth the risk.

Instead, solder female header pins to your PCB and place the EZO device in the female headers.



**Avoid using rosin core solder.**  
**Use as little flux as possible.**

**Flux residue will severely affect your readings.** Any Flux residue that comes in contact with the PRB pins or your probes connector will cause a "flux short".



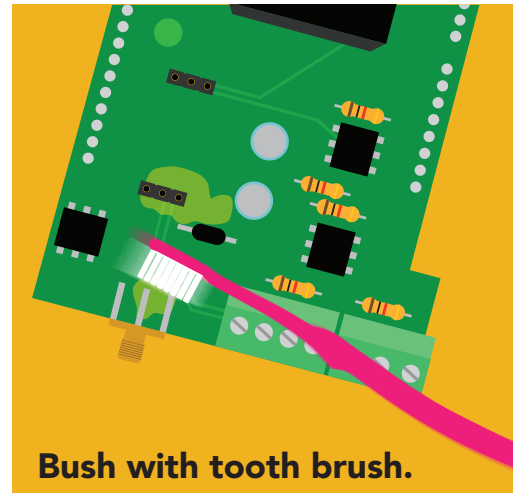
You **MUST** remove all the flux residue from your PCB after soldering.

# Soldering

Removing flux residue can be done with commercially available products such as flux off or you can use alcohol and a tooth brush.



Remove EZO Circuit and soak in alcohol for 10 mins.



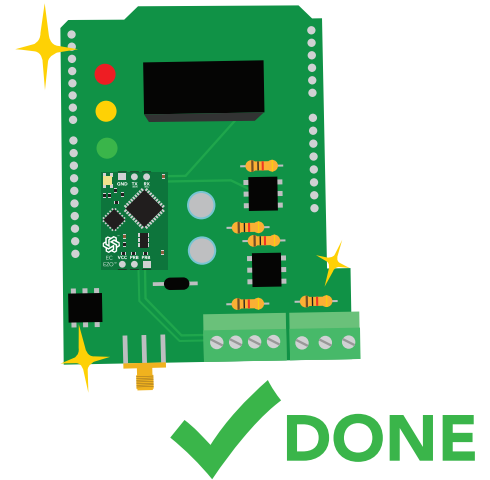
Bush with tooth brush.



Soak in alcohol for 5 mins.



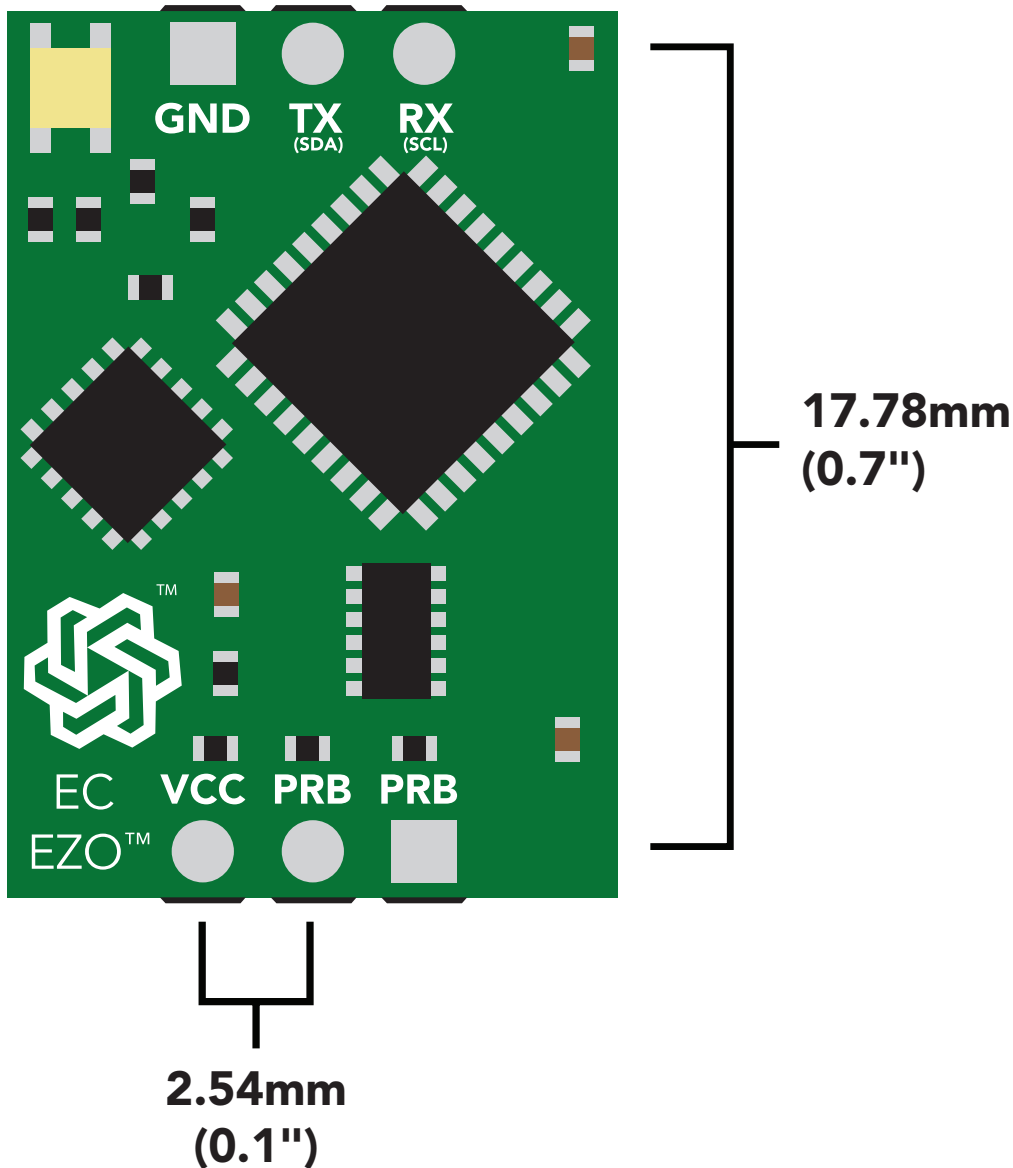
Let it dry in the air.



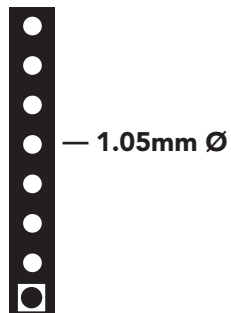
## What does a flux short look like?

Readings move slowly and take several minutes to reach the correct value.

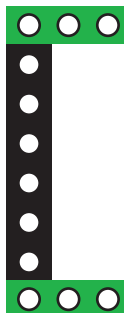
# EZO™ circuit footprint



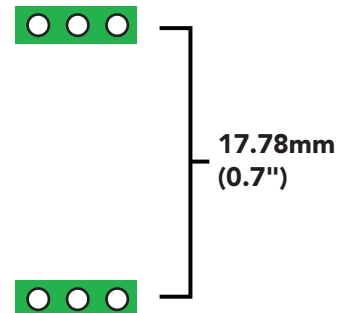
**1** In your CAD software, place a 8 position header.



**2** Place a 3 position header at both top and bottom of the 8 position.



**3** Delete the 8 position header. The two 3 position headers are now 17.78mm (0.7") apart from each other.



# Datasheet change log

## Datasheet V 6.4

Revised entire document.

## Datasheet V 6.3

Revised naming device info on pages 36 & 63.

## Datasheet V 6.2

### Added new command:

"TDS,n" Changing the TDS (ppm) conversion factor on pages 30 (UART) & 57 (I<sup>2</sup>C).

## Datasheet V 6.1

Corrected typos within the datasheet.

## Datasheet V 6.0

Changed the K value range from 0.1 to 0.01 on pg 5.

## Datasheet V 5.9

Moved Default state to pg 17.

## Datasheet V 5.8

Revised conductivity probe range information on pg 5.

## Datasheet V 5.7

Revised response for the sleep command in UART mode on pg 39.

## Datasheet V 5.6

Added more information on the Export calibration and Import calibration commands.

## Datasheet V 5.5

Revised calibration theory pages, added information on temperature compensation on pg. 15, moved data isolation to pg 9, and correct wiring to pg 11.

## Datasheet V 5.4

Revised isolation schematic on pg. 13

## Datasheet V 5.3

### Added new command:

"RT,n" for Temperature compensation located on pages 30 (UART) & 55 (I<sup>2</sup>C).  
Added firmware information to Firmware update list.

## Datasheet V 5.2

Revised calibration information on pages 27 & 52.

## Datasheet V 5.1

Added more information about temperature compensation on pages 30 & 55.

## Datasheet V 5.0

Changed "Max rate" to "Response time" on cover page.

## Datasheet V 4.9

Removed note from certain commands about firmware version.  
Added steps to calibration command pages 27 (UART) and 52 (I<sup>2</sup>C).

## Datasheet V 4.8

Revised definition of response codes on pg 46.

## Datasheet V 4.7

Revised cover page art.

## Datasheet V 4.6

Updated calibration processing delay time on pg.52.

## Datasheet V 4.5

Revised Enable/disable parameters information on pages 31 & 56.

## Datasheet V 4.4

Updated High point calibration info on page 11.

## Datasheet V 4.3

Updated calibration info on pages 27 (UART) and 52 (I<sup>2</sup>C).

## **Datasheet V 4.2**

Revised Plock pages to show default value.

## **Datasheet V 4.1**

Corrected I<sup>2</sup>C calibration delay on pg. 52.

## **Datasheet V 4.0**

Revised entire datasheet.

# Firmware updates

V1.0 – Initial release (April 17, 2014)

V1.1 – (June 2, 2014)

- Change specific gravity equation to return 1.0 when the uS reading is < 1000 (previously returned 0.0)
- Change accuracy of specific gravity from 2 decimal places to 3 decimal places
- Don't save temperature changes to EEPROM

V1.2 – (Aug 1, 2014)

- Baud rate change is now a long, purple blink

V1.5 – Baud rate change (Nov 6, 2014)

- Change default baud rate to 9600

V1.6 – I2C bug (Dec 1, 2014)

- Fixed I<sup>2</sup>C bug where the circuit may inappropriately respond when other I2C devices are connected

V1.8 – Factory (April 14, 2015)

- Changed "X" command to "Factory"

V1.95 – Plock (March 31, 2016)

- Added protocol lock feature "Plock"

V1.96 – EEPROM (April 26, 2016)

- Fixed bug where EEPROM would get erased if the circuit lost power 900ms into startup  
This would cause the EZO circuit to revert back to UART mode if set to I2C

V2.10 – (April 12, 2017)

- Added "Find" command.
- Added "Export/import" command.
- Modified continuous mode to be able to send readings every "n" seconds.
- Default output changed from CSV string of 4 values to just conductivity; Other values must be enabled

V2.11 – (April 28, 2017)

- Fixed "Sleep" bug, where it would draw excessive current.

V2.12 – (May 9, 2017)

- Fixed bug in sleep mode, where circuit would wake up to a different I<sup>2</sup>C address.

V2.13 – (July 16, 2018)

- Added "RT" command to Temperature compensation

V2.14 – (Nov 26, 2019)

- The K value range has been extended to 0.01

V2.15 – (June 29, 2020)

- Fixed bug where output doesn't always round to 0

# Firmware updates

V2.16 – (Dec 14, 2021)

- Internal update for new part compatibility.

# Warranty

Atlas Scientific™ Warranties the EZO™ class Conductivity circuit to be free of defect during the debugging phase of device implementation, or 30 days after receiving the EZO™ class Conductivity circuit (which ever comes first).

## The debugging phase

The debugging phase as defined by Atlas Scientific™ is the time period when the EZO™ class Conductivity circuit is inserted into a bread board, or shield. If the EZO™ class Conductivity circuit is being debugged in a bread board, the bread board must be devoid of other components. If the EZO™ class Conductivity circuit is being connected to a microcontroller, the microcontroller must be running code that has been designed to drive the EZO™ class Conductivity circuit exclusively and output the EZO™ class Conductivity circuit data as a serial string.

**It is important for the embedded systems engineer to keep in mind that the following activities will void the EZO™ class Conductivity circuit warranty:**

- **Soldering any part of the EZO™ class Conductivity circuit.**
- **Running any code, that does not exclusively drive the EZO™ class Conductivity circuit and output its data in a serial string.**
- **Embedding the EZO™ class Conductivity circuit into a custom made device.**
- **Removing any potting compound.**

# Reasoning behind this warranty

Because Atlas Scientific™ does not sell consumer electronics; once the device has been embedded into a custom made system, Atlas Scientific™ cannot possibly warranty the EZO™ class Conductivity circuit, against the thousands of possible variables that may cause the EZO™ class Conductivity circuit to no longer function properly.

## Please keep this in mind:

- 1. All Atlas Scientific™ devices have been designed to be embedded into a custom made system by you, the embedded systems engineer.**
- 2. All Atlas Scientific™ devices have been designed to run indefinitely without failure in the field.**
- 3. All Atlas Scientific™ devices can be soldered into place, however you do so at your own risk.**

Atlas Scientific™ is simply stating that once the device is being used in your application, Atlas Scientific™ can no longer take responsibility for the EZO™ class Conductivity circuits continued operation. This is because that would be equivalent to Atlas Scientific™ taking responsibility over the correct operation of your entire device.